

0-782933

На правах рукописи



БЛАЗНОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**УСТРОЙСТВА И МЕТОДЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ АНИЗОТРОПНЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ СТЕРЖНЕЙ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Барнаул – 2009

Работа выполнена в Алтайском государственном университете
и ООО «Бийский завод стеклопластиков»

Научный консультант

доктор технических наук, профессор
Старцев Олег Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Попов Валерий Андреевич

доктор технических наук, профессор
Бабаевский Петр Гордеевич

доктор технических наук, доцент
Татаринцева Ольга Сергеевна

Ведущая организация

Институт физики прочности и материаловедения
СО РАН, г. Томск

Защита состоится 23 октября 2009 года в 15.00 ч. на заседании диссертационного
совета Д 212.005.03 в Алтайском государственном университете по адресу:
656049, г. Барнаул, пр-т Ленина, 61.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного
университета

Автореферат разослан 22 сентября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Рудер Д.Д.

Актуальность темы. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе эпоксисоединений, армированные углеродными, органическими, стеклянными волокнами, являются анизотропными системами, и их применение с каждым годом расширяется. Согласно мнению ведущих ученых в области разработки методов механических испытаний ПКМ (Ю.М. Тарнопольский с сотрудниками), стандарты, разработанные еще в 80-х гг. прошлого века в основном для изотропных пластмасс, отстают от быстро развивающихся технологий создания анизотропных ПКМ. Стандартные методы испытаний обладают рядом недостатков, главный из которых – зависимость результатов измерений от разрешенных стандартами вариаций формы и размеров образцов и способов крепления. Различия измеренных показателей прочности и модулей упругости составляют недопустимые десятки процентов. Особенно проблемными являются испытания на длительную прочность, воздействие температуры, циклическую выносливость. Применение стандартных методов для испытаний образцов круглой формы зачастую невозможно из-за проблем соединения с металлическим захватом, внутри которого или по границе и происходит разрушение под действием контактных напряжений.

Разработке новых и совершенствованию ранее принятых методов испытаний анизотропных ПКМ посвящено большое количество работ, но отдельные достигнутые положительные результаты не нашли широкого распространения и не стандартизованы. Это вызвано сложностью, высокой стоимостью и временными затратами на изготовление образцов и оснастки для испытаний, что делает предложенные способы и установки малоприменимыми для массовых испытаний при контроле серийной продукции. Часто методы и оснастка не обеспечивают воспроизводимости результатов, которые зависят от квалификации исследователя.

В настоящее время технологии создания и исследований ПКМ отнесены к критическим, имеющим приоритетное значение для развития научно-технологического комплекса России. В связи с реализацией новых наукоемких технологий изготовления и расширением номенклатуры ПКМ, разрыв между технологиями и методами испытаний возрастает с каждым годом. Таким образом, на сегодняшний день «инструмент», с помощью которого можно надежно характеризовать механические свойства вновь создаваемых композитов, прогнозировать изменение этих свойств в процессе эксплуатации и сравнивать их с зарубежными и отечественными аналогами, нуждается в существенном усовершенствовании.

При проектировании ответственных конструкций: зданий, сооружений, мостов, тоннелей, корпусов на основе ПКМ необходимы надежные данные о материале для расчета несущей способности в условиях эксплуатации на длительный период. Обычно, для нового малоизученного материала, прогнозирование производят на основе экспериментальных исследований для каждого вида нагружения, приближенного к условиям эксплуатации. При этом, вызванное погрешностями экспериментального метода, чрезмерное завышение несущей способности может привести к аварийной ситуации, большим убыткам и человеческим жертвам, а занижение истинной прочности в результатах испытаний и расчетов увеличивает себестоимость конструкции, и делает материал малопривлекательным и неконкурентноспособным по сравнению с традиционными, такими как металлы и сплавы.

В связи с этим, актуальной задачей является развитие методов испытаний для определения механических и эксплуатационных свойств анизотропных ПКМ, получение достоверных экспериментальных данных о характеристиках материала в исходном состоянии и снижении их в процессе длительной эксплуатации, разработка новых способов обработки экспериментальных данных с целью повышения точности результатов, снижения стоимости и сроков испытаний и развитие методик расчета несущей способности конструкций из ПКМ на основе оптимизации технико-экономических показателей и экспериментально проверенных свойств материалов.

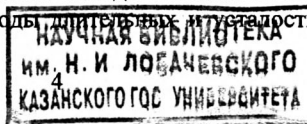
Часть исследований выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (мероприятие 1.3 Программы, 1 очередь), заявка 2009-03-1.3-24-06-142, тема «Работы по проведению проблемно-ориентированных поисковых исследований и формированию научно-технического задела в области создания и обработки композиционных и керамических материалов», госконтракт № 02.513.11.3457.

Целью работы является разработка новых и совершенствование известных методов и устройств механических испытаний анизотропных стержней круглой формы, обладающих универсальностью, простотой осуществления, обеспечивающих информативность, достоверность и воспроизводимость результатов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить комплекс задач:

- провести анализ состояния вопроса механических испытаний ПКМ, выявить недостатки существующих методов и устройств испытаний с целью их исправления;
- создать специальное оборудование для реализации методов испытаний, учитывающих особенности анизотропных стержней;
- проанализировать и минимизировать источники погрешности методов испытаний и оценить величину вносимых погрешностей в определяемые характеристики;
- провести экспериментальную отработку и выбор оптимальных условий испытаний и размеров образцов, обосновать требования к оснастке и измерительным приборам;
- провести апробацию методов и устройств на испытаниях выбранного класса анизотропных стержней, выявить граничные условия методов испытаний;
- разработать алгоритмы автоматизированного управления и обработки результатов испытаний;
- разработать прикладные методики и оборудование для исследовательских, типовых, сертификационных, приемосдаточных испытаний анизотропных ПКМ и изделий, пригодные для введения в нормативную документацию;
- провести экспертизу и апробацию разработанных методов и устройств в независимых организациях и на действующем производстве, накопить статистику результатов испытаний, внедрить разработанные методы в практику промышленного контроля материалов и изделий.

Объектом исследования являются методы механических испытаний ПКМ на растяжение, сжатие, изгиб, методы длительных и усталостных испытаний и термомеханических исследований.



Предметом исследования являются круглые однонаправленно армированные стеклопластиковые стержни диаметром от 2 до 46 мм с высоким объемным содержанием стеклянных армирующих волокон 0,60–0,75. Матрицей в исследованном стеклопластике является связующее марки ЭДИ на основе эпоксидных смол ЭД-20 или ЭД-22 и ангидридного отвердителя изо-МТГФА. Армирующие волокна – ровинги из алюмоборосиликатного стекла (стекла Е) с диаметром элементарной нити от 13 до 20 мкм. Эти стержни обладают наиболее высокой прочностью вдоль армирования при достаточно низкой прочности в поперечном направлении, что вызывает дополнительные трудности при проведении измерений механических показателей. Апробация разработанных методов испытаний выполнена также на нескольких видах однонаправленных стекло- и базальтопластиковых стержней круглого сечения диаметром 5–7 мм, и углепластиковых плитах авиационного назначения толщиной 2, 4, 10 мм.

Для решения поставленных задач применены **теоретический и экспериментальный методы исследований**. Теоретическим методом исследовано поведение образцов в процессе нагружения, найдены выражения для описания напряженного состояния стержней, оценки погрешностей методов испытаний. Для обработки и обобщения результатов экспериментов в аналитические и эмпирические зависимости применены методы статистической обработки данных с использованием ЭВМ. Экспериментальные исследования служат для отработки оборудования, исследования влияния размеров образцов и оснастки на результат испытаний, исследований применимости установок для испытаний ПКМ, демонстрации работоспособности методов и устройств на примере определения механических характеристик материала в исходном состоянии, а также при длительном действии постоянных и циклических нагрузок при различных температурах.

Научная новизна. Разработаны новые экспериментальные методы и устройства для изучения механических свойств анизотропных стеклопластиковых стержней. При этом впервые:

- разработан новый метод продольного изгиба для определения механических свойств анизотропных стержней цилиндрической формы, позволяющий при локализации разрушения в рабочей зоне образца одновременно определять значения модуля, прочности, предельной деформации, энергии разрушения, и упругих показателей ПКМ;

- исследовано влияние факторов, влияющих на результаты измерений методом продольного изгиба (форма и размеры образцов, эксцентриситет оси образца, температура испытаний и др.), на основе которых обоснована универсальность метода для статических и циклических режимов испытаний стеклопластиковых стержней и предложены корректирующие выражения для минимизации погрешностей;

- предложена новая методика расчета конструкционной прочности ПКМ, основанная на информации о механических показателях, определенных продольным изгибом и учете факторов заделки в зажимах (концентрации напряжений) при растяжении и сжатии;

- определены закономерности влияния длительно действующих постоянных нагрузок при растяжении, сжатии и продольном изгибе на стеклопластиковые

стержни, на основе которых разработаны метод и устройства для экспресс-испытаний на длительную прочность при постоянной нагрузке при температурах, соответствующих стеклообразному состоянию связующего;

—предложена новая методика обработки результатов испытаний стеклопластиковых стержней на долговечность при статических и циклических нагрузках, основанная на гипотезе о соответствии между прочностью и долговечностью ПКМ, позволяющая сократить время длительных испытаний до 3 месяцев, уменьшить количество образцов и повысить точность измерений;

—разработана методика инженерного расчета несущей способности стеклопластиковых стержней для ответственных конструкций, учитывающая влияние размеров, способов заделки, длительности и величины приложенной нагрузки и температуры на исходные свойства изделий.

Практическая значимость заключается в разработке прикладных методик и оригинальных конструкций установок для испытаний однонаправленных стеклопластиковых стержней круглого сечения на растяжение, сжатие, поперечный и продольный изгиб; автоматизации процесса испытаний и обработки результатов; применении приемов малообразцовых испытаний на длительную прочность и циклическую выносливость, в совокупности с оригинальной обработкой результатов. Существенно расширена область применения метода продольного изгиба в диапазоне температур от минус 70 до 60 °С, соответствующих температурам эксплуатации изделий в условиях разных климатических районов; с помощью разработанных методов проведены сравнительные исследования однонаправленных круглых стержней из стекло- и базальтопластиков, отличающихся по рецептуре и свойствам; методы получили практическое использование для испытаний плоских образцов, вырезанных из углепластиковых плит авиационного назначения.

Реализация результатов исследований. Разработанные методы и устройства внедрены в ООО «Бийский завод стеклопластиков» (БЗС) для приемоосдаточных, периодических и типовых испытаний. Методы и оборудование для механических испытаний временной, длительной и усталостной прочности однонаправленных стеклопластиков, а также способы оригинальной обработки результатов использованы в нескольких организациях: БЗС, г. Бийск; испытательном центре СМИК «СибНИИСтрой», г. Новосибирск; ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина» (СибНИИА), г. Новосибирск; испытательном центре СМИК «Стройэксперт», г. Новосибирск; Институте проблем нефти и газа (ИПНГ) СО РАН, г. Якутск. Методики испытаний введены в технические условия для заводского контроля изделий на основе однонаправленных стеклопластиковых стержней круглого сечения, полученные характеристики внесены в нормативную документацию на изделия и используются для проекторочного расчета ответственных конструкций в строительстве, нефтегазовом машиностроении, электротехнической промышленности и горном деле.

Разработанные методы и устройства для испытаний, полученные характеристики композиционных материалов и публикации автора используются в учебном процессе в лекционных курсах, при проведении практических и лабораторных занятий, выполнении курсовых и дипломных работ в Алтайском государственном техническом университете (АлтГТУ) им. И.И. Ползунова, Алтайском государственном университете (АлтГУ), г. Барнаул, и Бийском технологическом институте

(БТИ). Использование результатов исследований на промышленных предприятиях, в ведущих научных центрах и вузах подтверждено актами внедрения.

Достоверность результатов исследований подтверждена использованием известных положений фундаментальных наук и непротиворечивых физикоматематических моделей, удовлетворительным согласованием расчетных и опытных данных, использованием для выполнения экспериментальных измерений высокоточных современных измерительных приборов, проведением государственной поверки используемого оборудования, анализом погрешностей экспериментов по стандартным методикам, независимой апробацией и экспертизой разработанных методов и устройств испытаний в сторонних организациях, а также успешным многолетним применением разработанных методов и устройств для контроля выпускаемых стеклопластиковых изделий на промышленном предприятии.

На защиту выносятся:

- методы и устройства для экспериментальных исследований анизотропных стеклопластиковых стержней круглого сечения на растяжение, сжатие, трехточечный поперечный изгиб, сдвиг вдоль волокон, метод и устройство термомеханических испытаний армированных пластиков;

- метод испытания на продольный изгиб и конструкции установок для определения временной, длительной и усталостной прочности, модуля упругости и деформации однонаправленных стеклопластиков;

- новые способы обработки результатов малообразцовых длительных и циклических испытаний;

- результаты экспериментальных исследований предложенными методами однонаправленных стеклопластиковых стержней в диапазоне диаметров 2–46 мм, в интервале температур от минус 70 до 60 °С; в диапазоне времени длительных испытаний до 7 лет; в диапазоне усталостных испытаний до 10^7 циклов.

- методика расчета конструкционной прочности, долговечности и выносливости стеклопластиковых стержней и конструкций;

- результаты экспериментальных исследований базальтопластиковых круглых стержней, испытаний плоских образцов из углепластиковых плит.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях: II-VI Всерос. науч.-техн. конф. «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (г. Бийск, 2001-2005); науч.-практ. конф. «Технические проблемы современного жилищно-гражданского строительства. Проектирование и строительство» (г. Новосибирск, 2002); IV Всерос. конф. «Проблемы качества в строительстве» (г. Новосибирск, 2003); конф. «Проектирование и строительство монолитных многоэтажных жилых и общественных зданий, мостов и тоннелей» (г. Москва, 2004), межд. науч.-техн. конф. «Подвесные и опорные полимерные изоляторы: производство, технические требования, методы испытаний, опыт эксплуатации, диагностика» (г. Санкт-Петербург, 2004); 10-я Сибирская межд. конф. по железобетону (г. Новосибирск, 2004); III межд. науч.-техн. конф. «Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте» (г. Самара, 2005); IV, VI- IX Всерос. науч.-практ. конф. «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерально-

го сырья» (г. Бийск, 2004, 2006-2009); 19-я Всерос. конф. «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности» (г. Новосибирск, 2005); I, II-я Всерос. науч.-практ. конф. «Управление качеством образования, продукции и окружающей среды» (г. Бийск, 2006, 2007); V-я Всерос. науч.-практ. конф. «Ресурсосберегающие технологии в машиностроении» (г. Бийск, 2006).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 72 научных работы, в том числе 16 статей в центральных журналах, рекомендуемых ВАК, 2 патента на изобретение и 1 коллективная монография, остальные доклады в сборниках конференций.

Личный вклад автора состоит в формулировании основных научных идей, разработке программ исследований и планировании экспериментов, разработке методов испытаний и конструкций оборудования; в создании прикладных методик и инструкций испытаний и обработки результатов, руководстве аспирантами, сотрудниками и студентами-дипломниками по работам в исследуемой области, выполнении приемосдаточных, периодических, типовых и сертификационных испытаний изделий, подготовке технических условий на производстве, реализации научных разработок в учебном процессе. Большая часть экспериментальных исследований выполнена автором.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 335 наименований, 12 приложений, изложена на 345 страницах текста, содержит 126 рисунков, 32 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, приведены цель и содержание поставленных задач, дано описание объекта, предмета и методов исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость результатов работы, представлена реализация результатов исследований и их апробация; указаны основные положения, выносимые на защиту, дано краткое изложение диссертации по главам.

Первая глава посвящена литературному обзору действующих методов и устройств для испытаний ПКМ на растяжение, сжатие и изгиб, сдвиг вдоль волокон, термомеханических исследований, анализу их достоинств и недостатков. Приведены количественные сравнения результатов испытаний разными методами и продемонстрирована зависимость результатов измерений от схемы испытаний, формы и размеров образцов.

В этой главе рассмотрены современные методы механических испытаний ПКМ, стандартизованные в России, США, Германии, Великобритании, Франции. Большинство методов предназначены для испытаний плоских образцов в форме пластин и лопаток различной конфигурации и размеров.

По литературным данным продемонстрировано, что для образцов, используемых разными стандартами для испытаний на растяжение, вариация характерных форм двусторонних лопаток шириной нагрузочной части от 25 до 40 мм, длиной 127–400 мм, при ширине рабочей части в диапазоне 6–20 мм не приводят к каким-либо закономерным улучшениям точности определяемых характеристик: значения прочности на растяжение варьируются от 500 до 800 МПа, при значениях разбросов 10–20 %. Результаты испытаний на сжатие в еще большей степени

чувствительны к форме и размерам образцов, и изменяются в диапазоне от 200 до 400 МПа, т.е. вдвое. Измеренная прочность на сдвиг по разным методам составляет 60–100 МПа для углепластиков, и 48–84 МПа для стеклопластиков. Такие значительные разбросы вызваны не свойствами материалов, а несовершенством методов и устройств для испытаний анизотропных ПКМ, обладающих высокой прочностью вдоль армирования и низкой – в поперечном направлении. В силу указанных специфических свойств однонаправленных композитов, при использовании стандартных методов и устройств происходит проскальзывание в захватах, разрушение путем расслаивания или разрушение внутри захвата или по краю его вследствие низкой сдвиговой прочности. Стандартные методы статических испытаний образцов круглой формы отсутствуют.

Существенные различия в результатах экспериментов послужили причиной внесения в справочные данные разных значений прочности и модуля упругости для разных видов нагружения. Для однонаправленных композитов значения модуля Юнга E и прочности σ при растяжении и сжатии вдоль волокон теоретически должны быть равны, и рассчитываться по известному правилу смесей:

$$\left. \begin{aligned} E &= E_A \cdot \varphi_A + E_M (1 - \varphi_A), \\ \sigma &= (E_A \cdot \varphi_A + E_M \cdot (1 - \varphi_A)) \cdot \varepsilon, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где E_A , E_M – модуль упругости армирующего материала и полимерной матрицы соответственно; φ_A – объемное содержание армирующих волокон в композите; ε – предельное значение деформации материала.

Несоответствие экспериментальных и расчетных по правилу смесей данных исследователи объясняют не погрешностью методики измерений, а природой композита. При трудоемкой и тщательной подготовке образцов и захватов для испытаний, при корректной обработке результатов крайне редко удается достичь равенства значений прочности и модуля упругости при сжатии, растяжении и изгибе. Таким образом, до сих пор в литературе существуют противоречивые данные об экспериментальных результатах определения механических свойств ПКМ, вызванные несовершенством использованных методов измерений.

Для испытаний ПКМ в условиях длительного и усталостного нагружений применяют растяжение, сжатие и изгиб. Длительную прочность и долговечность исследовали Журков С.Н., Бартенев Г.М., Скудра А.М., Булавс Ф.Я., Роценс К.А., Ратнер С.Б., Регель В.Р., Степанов В.А., Иванова И.Н., Петров М. Г., и многие другие ученые. Для определения долговечности t предложено несколько выражений, основанных на кинетической концепции разрушения материалов, наибольшее распространение среди которых получила формула Журкова:

$$t = t_0 \cdot \exp((U_0 - \gamma \cdot \sigma) / kT), \quad (2)$$

где t_0 – постоянная времени (для стеклопластиков 10^{-13} с), U_0 – энергия активации процесса разрушения; γ – структурно чувствительный параметр, достигающий $10 \div 10^3$ атомных объемов; σ – постоянное приложенное напряжение; $k = 8,314$ Дж/моль·К – постоянная Больцмана; T – температура, К.

На практике, используя результаты, полученные при разных температурах в широком диапазоне скоростей нагружения, и принцип температурно-временной аналогии, по выражению (2) экстраполируют результаты испытаний длительностью несколько часов на срок эксплуатации материалов в 50–100 лет.

Формула Журкова справедлива для различных материалов (более 100): металлов и сплавов, стекол, полимеров, композитов, горных пород. В связи с этим она была положена в основу различных кинетических концепций разрушения твердых тел. Однако долговечность эластомеров и некоторых классов полимерных материалов не удается описать формулой Журкова. Для этих материалов применяют формулу Бартенева:

$$t = C \cdot \sigma^{-b} \cdot \exp(U/kT),$$

где C – константа, определяемая эмпирическим путем.

Для прогнозирования долговечности стеклопластиков Скудра и Булавс предложили зависимость

$$t = n \cdot \exp\left(-\frac{T - T_0}{B}\right) \cdot \frac{(1 - \varphi_A) \cdot E_M + \varphi_A \cdot E_A}{(1 - \varphi_A) \cdot H_M + \varphi_A \cdot E_A} \times \\ \times \ln \frac{(E_M - H_M) \cdot E_A \cdot (1 - \varphi_A) \cdot F}{[(1 - \varphi_A) \cdot E_A \cdot F - \varepsilon \cdot E_A \cdot A \cdot ((1 - \varphi_A) \cdot H_M + \varphi_A \cdot E_A)] \cdot [(1 - \varphi_A) \cdot H_M + \varphi_A \cdot E_A]} \quad (3)$$

где n , B – коэффициенты, F – постоянная нагрузка, A – площадь поперечного сечения, H_M – модуль длительной упругости матрицы.

В области кратковременных испытаний, длительностью несколько часов, выражения (2) и (3) дают близкие результаты, но значительно расходятся при экстраполяции экспериментальных данных на большое время, которое представляет основной интерес для предсказания работоспособности материала. Согласно представлениям Скудры и Булавса, для некоторых ПКМ имеется безопасное напряжение σ_∞ , физический смысл которого определяет наличие у композита предела длительной прочности – такого максимального напряжения, ниже которого материал не будет разрушаться сколь угодно долго. Согласно экспериментальным исследованиям, для стеклопластиков величина безопасного напряжения составляет 0,4 – 0,7 от значения временной прочности.

Проблема экспериментального подтверждения долговечности заключается в сложности организации эксперимента на длительный срок. Для ПКМ, согласно многим исследователям, эта проблема осложнена еще и повышенным разбросом свойств в исходном состоянии, что влечет повышенный разброс значений долговечности. Таким образом, при длительных испытаниях ПКМ в естественных условиях неизбежно возникнет ситуация, что часть образцов разрушится в реальном времени, отведенном на эксперимент, а часть не разрушится сколь угодно долго.

В связи с этим методы ускоренных испытаний не отражают истинное поведение материала в реальных условиях под действием постоянной статической нагрузки, поэтому не обеспечивают необходимой достоверности, а методы испытаний, основанные на измерении долговечности нагруженного образца, малопригодны для контроля изделий и материалов при изготовлении, отработке рецептур и технологии. Необходима разработка новых экспериментальных методов длительных испытаний и обработки результатов, которые опирались бы на фундаментальные основы материаловедения и физики прочности материалов, но с другой стороны, позволяли достоверно прогнозировать свойства ПКМ на заданный срок эксплуатации до 50-100 лет за разумное время лабораторных испытаний, не превышающее нескольких месяцев.

Данные по исследованию усталостной прочности и выносливости ПКМ под действием переменных циклических нагрузок показывают, что каждый материал ведет себя индивидуально и результаты испытаний сильно зависят от схемы нагружения (растяжение, сжатие, изгиб) и величины минимального и максимального напряжения в цикле. Оценка усталостной прочности производится каждый раз эмпирическим путем для нового материала или изделия. При усталостных испытаниях особо сказываются проблемы соединения с захватом, формы и размеров образцов, температуры испытаний, скорости нагружения, присущие методам статических испытаний. Все это и порождает противоречивые результаты.

В результате анализа выявлены главные источники погрешностей при измерениях механических показателей анизотропных ПКМ: форма и размеры образцов; степень анизотропии ПКМ; температурно-временной режим нагружения; схема нагружения; влияние креплений и захватов на разрушение образцов; инструментальные погрешности; погрешности при обработке результатов измерений.

Это определило область дальнейших исследований, направленных на развитие новых и совершенствование известных методов испытаний анизотропных стеклопластиков в условиях статического, длительного и циклического нагружения.

Во второй главе дано краткое описание промышленно изготавливаемых однопосланных стеклопластиковых стержней, и обоснован их выбор как основного материала для исследований. Основная часть главы 2 посвящена развитию методов статических испытаний при различных видах нагружения.

Современные стержневые изделия из ПКМ обладают высокой прочностью в осевом направлении, низким коэффициентом теплопроводности, высокой электрической прочностью, низкой удельной массой. Уникальное сочетание перечисленных свойств этого класса изделий открыло широкие возможности для применения их в различных отраслях техники. Стеклопластиковые стержни диаметром от 1 до 4 мм применяют в качестве силового армирующего элемента в оптоволоконных кабелях, а стержни диаметром 4–32 мм используют в качестве гибких связей в трехслойных панелях и стенах или стеклопластиковой арматуры (СПА) в строительстве. Из-за хорошей электроизолирующей способности стержни диаметром 10–50 мм и более служат для изготовления полимерных изоляторов. В последнее время в России ведется разработка стеклопластиковых насосных штанг для нефтедобывающей промышленности, использование которых уже хорошо зарекомендовало себя за рубежом в связи с уменьшением в 2–3 раза веса колонны штанг и хорошей стойкостью стеклопластика в агрессивных средах, сопутствующих нефтедобыче. В горном деле стеклопластиковые стержни круглого сечения используют в качестве силовой составляющей анкерных элементов шахтной крепи, что создает шадящие условия для работы проходческого оборудования при последовательной выработке угольного или рудоносного пласта.

В результате анализа выявлены требования к изделиям из однопослленного стеклопластика по основным механическим показателям: прочность на растяжение и сжатие вдоль волокон 800–1300 МПа, на изгиб 1300–1600 МПа, на сдвиг вдоль волокон 40–60 МПа; модуль Юнга не ниже 50–55 ГПа; температурный интервал хранения и эксплуатации стержней в пределах от минус 70 до 60 °С; долговечность в статических условиях нагружения 50–100 лет; долговечность в усло-

виях циклического нагружения не менее 10^7 циклов. Выполнение этих требований осложняется тем, что отсутствуют обоснованные методы для испытаний ПКМ круглого сечения, что и обусловило выбор однонаправленных стеклопластиковых круглых стержней как основного материала для исследований.

Поскольку в литературе имеются противоречивые сведения о результатах испытаний стеклопластиков разными методами, для оценки достоверности того или иного метода были выполнены сравнительные испытания разными методами на одном материале. За основу принимались стандартные методы испытаний, предназначенные для плоских образцов. Испытательные устройства дорабатывали и усовершенствовали для образцов круглой формы.

Растяжение. В работе исследовано 18 различных схем соединения металлических оконцевателей с круглыми стеклопластиковыми стержнями. В зависимости от конструкции узла соединения получены значения прочности на растяжение от 600 до 1350 МПа. Разрушение образцов для всех схем происходило либо внутри оконцевателя, либо в месте перехода металл-стеклопластик, следовательно, истинный предел прочности материала на растяжение не достигнут. Из сравнения литературных данных и результатов выполненных измерений по ГОСТ 25.601-80, были выбраны две схемы испытаний на растяжение цилиндрических образцов постоянного диаметра от 1,5 до 4 мм и диаметром 5,5 и 7,5 мм с анкерными уширениями, показавшие наилучший результат (табл. 1), которые внедрены на БЗС для испытаний на растяжение стеклопластикового силового элемента ТУ 2296-005-20994511 и СПА ТУ 2296-001-20994511.

Таблица 1. Влияние формы образца на результат испытаний при растяжении стеклопластиковых стержней (расчетное значение прочности 2000-2200 МПа)

Вид образца	Метод испытаний	Характер разрушения	σ_p , МПа	V_σ , %
плоский образец	ГОСТ 25.601-80	в зажимах	795	25
пат. США № 4360288	растяжение	по краю оконцевателя	1100	15
цилиндрический образец с проточкой	ТУ 6-48-00204961-35-96	сдвиг центральной части относительно головок	1140	12
силовой элемент	ТУ 2296-005-20994511	обрыв в рабочей зоне, начало трещины по краю захвата	1350	8
СПА с анкером: - без засыпки - с сухим цементом - с алюминиевыми вкладышами	ТУ 2296-001-20994511	разрыв в зоне перехода цилиндрической части в коническую	800 1200 1300	6 8 8
с анкером, по литературным данным		в рабочей зоне	1400-1700	10
σ_p – среднее арифметическое значение прочности на растяжение, V_σ – значение коэффициента вариации для прочности				

Закрепление образца силового элемента осуществляется в двух парах фрикционных накладок, имеющих продольные пазы, соответствующие профилю и размерам изделия. При высоких результатах, (табл. 1), способ имеет недостатки: трещина зарождается по краю захвата, повышенное требование к точности накла-

док препятствует использованию для массовых приемосдаточных испытаний. Методика испытаний СПА заключается в растяжении анкерного стержня, закрепленного в разрезных втулках. Для предотвращения контакта образца со стальным захватом устанавливают прокладки из пластичного материала (медь, алюминий) или делают засыпку из сухого цемента. Разрушение образцов происходит в пределах захвата при значениях прочности, в 2 раза ниже расчетных, и обусловлено действием не только растягивающих, но и значительных по величине поперечных сжимающих напряжений.

Наилучшие результаты в таблице 1, взяты из литературы для оконцевателей в форме толстостенной трубы, заполненной расширяющимся цементом, или в форме длинного переходника, соединенного клеевым соединением со стержнем. Это приводит к распределению по большой длине поперечных напряжений, плавно возрастающих к задней части крепления стержня без резкой концентрации. Разрушение происходит в виде классического расслоения «метелкой» в средней части образца между захватами, при значениях прочности, наиболее близких к расчетным.

Таким образом, применяемые в настоящее время методы испытаний на растяжение не позволяют получить результаты, характеризующие прочностные свойства стержней из ПКМ круглого сечения с удовлетворительной точностью. Основная проблема состоит в том, что отсутствует единый универсальный способ соединения образца с захватом испытательной машины.

По результатам испытаний на растяжение показано, что усовершенствование устройств приводит к существенному улучшению результатов, повышая его вдвое по сравнению со стандартным методом испытаний плоских образцов. Предложенные устройства дают стабильные воспроизводимые результаты для контроля свойств однотипной продукции при ее массовом изготовлении. Однако при переходе к другому объекту необходимо трудоемкое исследование для обоснования вида новых захватов, что снижает ценность достигнутого улучшения методики.

Сжатие. При осевом сжатии, по мере увеличения нагрузки, может произойти потеря устойчивости стержня, искажающая результат испытания. Для проверки корректности использования стандартных методов для испытаний стеклопластиковых стержней проведены исследования допустимых пределов нагружения при сжатии в зависимости от их длины и способов заделки.

Испытания на сжатие с жесткой заделкой концов проводили в трех видах приспособлений: механическое крепление одновременно трех образцов с центровкой устройства в площадках испытательной машины; испытание одного круглого стержня с креплением в захватах по ГОСТ 4651-82; вклеивание стержней в металлические плунжеры и испытание по направляющей в виде трубы. Литературные данные и результаты испытаний СПА диаметром 5,5 мм одинаковой длины в разных приспособлениях на сжатие приведены в таблице 2. Видно, насколько сильно схема испытаний и способ заделки стержня влияют на результат.

Приспособление по ГОСТ 4651-82, адаптированное к круглым стержням, использовали в методике испытаний технических условий на СПА первой редакции в начале серийного выпуска, в результате испытаний было получено значение прочности при сжатии 450 МПа. Методика, основанная на испытании соосно вклеенных образцов в направляющих, введена в ТУ 2296-001-20994511-04 для пе-

риодических испытаний на сжатие СПА диаметром 5,5 и 7,5 мм, при этом повышено минимальное значение прочности того же материала до 900 МПа, т.е. вдвое по сравнению с начальными результатами. Недостатки схемы – разрушения по краю захвата, результаты очень чувствительны к несоосности приложения нагрузки, поэтому плунжеры должны точно соответствовать диаметру образца, а операция вклеивания повышает трудоемкость и время на подготовку к испытаниям, результаты зависят от качества работы исполнителя.

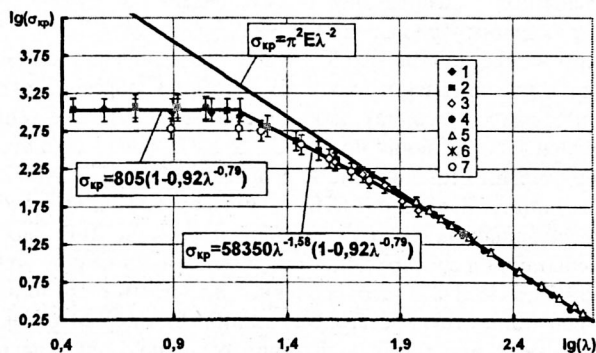
Таблица 2 - Результаты испытаний СПА на сжатие

Вид образца, схема испытаний	Характер разрушения	σ_c , МПа	V_c , %
плоский образец, ГОСТ 4651-82, (литературные данные)	смятие торцев, расслоение, потеря устойчивости	200-400	20
сжатие трех цилиндрических образцов	смятие торцев, подлом по краю захвата	600	15
цилиндрический образец, ГОСТ 4651-82	срез, излом по краю захвата	800	10
цилиндр. образец, «по направляющей»	излом со сдвигом под углом 45° в рабочей части	1000	8

σ_c – среднее арифметическое значение прочности на сжатие

Из результатов выполненных исследований можно сделать аналогичный вывод, сформулированный для растяжения. Стандартная схема испытаний на сжатие в зависимости от свойств композита допускает возможность потери устойчивости, а результат существенно зависит от способа крепления образцов. Путем специальных трудоемких исследований можно подобрать оптимальную схему закрепления образца. Но эта схема не является универсальной, а, следовательно, не является принципиальным улучшением методики испытаний на сжатие.

В ходе дальнейших испытаний на сжатие установлена зависимость критического напряжения от гибкости, которая имеет три ярко выраженные зоны, что соответствует наблюдаемым зависимостям для других материалов (например, стали – зона, ограниченная пределом текучести, зона Ясинского и зона Эйлера), (рис. 1).



1, 2 – жесткая заделка СПА-5,5 и 7,5 мм, соответственно; 3 – комбинированная заделка СПА-5,5 мм; 4, 5, 6 – шарнирная заделка стержней диаметром 5,5; 15 и 46 мм; 7 – результаты испытаний трех образцов СПА одновременно; линии – расчетные зависимости по выражениям (4)-(6)

Рисунок 1 - Зависимость критического напряжения от гибкости для стержней разного диаметра с различными способами заделки

При анализе результатов определены границы перехода одной области в другую и предложены эмпирические выражения для расчета величины критического напряжения $\sigma_{кр}$ с учетом коэффициента вариации и коэффициента запаса.

При $3 < \lambda < 16$ для коротких стержней $\sigma_{кр}$ имеет постоянное значение и не зависит от длины образца, для расчета его величины в работе предложено выражение:

$$\sigma_{кр} = 805 \cdot (1 - 0,92 \cdot \lambda^{-0,79}). \quad (4)$$

Для средних стержней на участке λ от 16 до 105 зависимость $\sigma_{кр}$ от λ отличается от кривой Эйлера, носит степенной характер (с коэффициентом 1,58) и определяется по выражению:

$$\sigma_{кр} = 58350 \cdot \lambda^{-1,58} \cdot (1 - 0,92 \cdot \lambda^{-0,79}). \quad (5)$$

При λ свыше 105 для длинных стержней зависимость $\sigma_{кр}$ от λ носит степенной характер (с коэффициентом 2,0), и определяется по формуле Эйлера с максимальным расхождением расчетных значений от экспериментальных 1-2 %, что объясняется технологическим разбросом значений модуля упругости образцов от 52 до 57 ГПа в зависимости от содержания связующего 15-20 % по массе:

$$\sigma_{кр} = \pi^2 \cdot E \cdot \lambda^{-2} \quad (6)$$

Комбинация геометрических размеров стеклопластиковых стержней и вариация способов заделки не приводят к изменению зависимости критического напряжения от гибкости, все экспериментальные точки в пределах разбросов ложатся на одну линию; следовательно, полученная зависимость характеризует не образцы и способы заделки, а исследованный материал - однонаправленный стеклопластик.

Важно отметить, что величина разбросов имеет максимальное значение 16% для коротких стержней, затем снижается, достигая 4-6 % при гибкости 20, и асимптотически приближается к значению 2 % с увеличением гибкости. Такие разбросы характерны для определяющих критериев: прочности для коротких образцов, комбинации прочности и модуля - для средних, и модуля для длинных образцов, которые теряют устойчивость без разрушения.

Трехточечный изгиб. Схема статического изгиба получила наибольшее распространение для испытаний ПКМ благодаря своей простоте. ГОСТ 25.604-82 регламентирует испытание образцов в форме пластин, что не позволяет напрямую применить данный метод для образцов круглой формы. Для того, чтобы обосновать такую возможность, были выполнены испытания СПА диаметром 5,5 мм, с разными нажимными наконечниками в форме цилиндра, шкива, призмы (рис. 2), чтобы обеспечить контакт с образцом в одной, двух и четырех точках. В одном из вариантов для исключения контакта металлического наконечника со стеклопластиковым стержнем использовали резиновую прокладку (рис. 2з). Чтобы установить влияние расстояния между опорами L на результат и привести все схемы к одной базе, испытания по схемам 4, в, з проводили при $L = 85$ и 100 мм, учитывая ширину наконечника 15 мм.

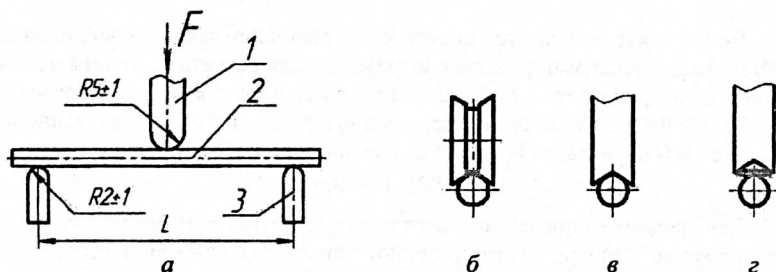


Рисунок 2 - Схема испытания круглых стержней на прочность при изгибе по ГОСТ 25.604-82 (а): 1 – нажимной наконечник, 2 – образец, 3 – опоры; и нажимные наконечники в виде шкива (б), призмы (в), призмы с резиновой прокладкой (г)

При испытаниях на стандартной машине Р-05, оснащенной датчиками измерения силы и перемещения, совмещенными с ПЭВМ, образцы доводили до разрушения, записывая диаграмму нагрузка-перемещение. Для повышения достоверности испытывали по 50 образцов для каждой схемы нагружения. Исходные диаграммы обрабатывали методом наименьших квадратов. По выражениям (6)–(8) определяли значения прочности $\sigma_{сн}$, предельной деформации $\varepsilon_{сн}$ и модуля Юнга $E_{сн}$, проводили статистическую обработку результатов испытаний и определяли средние значения параметров, и коэффициенты вариации V для них (табл. 3).

$$\sigma_{сн} = \frac{8 \cdot F \cdot (L - L_n)}{\pi \cdot d^3} \cdot \left[1 + 4 \cdot \left[\frac{f}{L} \right]^2 \right] \quad (6)$$

$$\varepsilon_{сн} = 6 \cdot d \cdot f / L^2 \quad (7)$$

$$E_{сн} = \partial \sigma_{сн} / \partial \varepsilon_{сн} \quad (8)$$

где F – поперечная сила; L, L_n – длина нагружаемой базы образца и наконечника; d – диаметр образца; f – прогиб; величина $4(f/L)^2$, учитывающая влияние продольной составляющей реакции опоры на величину нагрузки.

Таблица 3 – Результаты испытаний на трехточечный поперечный изгиб СПА-5,5

Схема испытаний	L, мм	Напряжение		Деформация		Модуль Юнга	
		$\sigma_{сн}$, МПа	V_{σ} , %	$\varepsilon_{сн}$, %	V_{ε} , %	$E_{сн}$, ГПа	V_E , %
По рис. 4-а	85	1130	8,27	2,23	7,85	53,0	3,97
По рис. 4-б	85	1560	11,2	3,41	9,91	44,9	3,70
По рис. 4-в	100	1480	10,1	3,21	10,6	45,6	2,97
По рис. 4-г	100	2180	3,91	5,51	4,73	45,9	2,62
По рис. 4-в	85	1410	13,4	3,40	13,4	35,0	2,75
По рис. 4-г	85	2130	2,65	5,60	5,02	37,6	3,10
Расчетные значения	—	2030	2,70	3,60	2,78	56,3	2,70

Полученные результаты сопоставлены в таблице 3 с расчетными значениями по выражениям (1). Большая статистика дает возможность установить причину экспериментальных разбросов при механических испытаниях. Коэффициенты вариации прочности для схемы рисунка 2г составляют 2-3%, что приближается к разбросу свойств материала. Этот же материал при испытаниях по другим схемам

дает разбросы на уровне 10-13 %, что говорит об отклонениях, вносимых схемой испытаний и погрешностью метода. Средние значения определяемых характеристик и степень их приближения к расчетным также свидетельствуют о качестве метода. Это лишний раз показывает, что использованные для исследований образцы СПА достаточно хороши с методической точки зрения как объект исследования, так как разбросы их свойств малы.

Большое отличие результатов испытаний обусловлено различной концентрацией напряжений в зоне контакта испытуемого образца с нажимным наконечником. При испытаниях с наконечником по ГОСТ 25.604-82 точечный контакт создает наихудшие условия взаимодействия, чему соответствуют самые низкие результаты по прочности. Но эта схема дает наиболее близкие к истинным значения модуля Юнга с отклонением около 5 %. При испытаниях с наконечниками в форме шкива и призмы, снижение контактных напряжений влияет на рост значения прочности испытуемого образца. Испытания же с резиновой прокладкой характеризуются контактом образца и нажимного наконечника практически по всей площади их соприкосновения, что и отражается на результатах испытаний – получена максимальная прочность, наиболее соответствующая расчетной. Эта схема внедрена в ТУ 2296-001-20994511-06 для определения прочности СПА при поперечном изгибе. В ней не учитываются завышенные значения деформации и заниженные значения модуля Юнга из-за смятия прокладки.

При испытаниях на трехточечный изгиб продемонстрировано, как с помощью существенной доработки методики можно достичь достоверных измерений, близких к расчетным. Для этого необходимо использовать два разных приспособления для измерения прочности и модуля, что недопустимо по временным и материальным затратам в производственных условиях для контроля продукции. Поэтому нужны более рациональные универсальные решения, которые позволяли бы в одном испытании достоверно определять упругопрочностные свойства материала.

Продольный изгиб. Именно этот метод позволил преодолеть недостатки рассмотренных выше схем нагружения. Сущность метода заключается в продольном изгибе шарнирно опертого тонкого стержня вплоть до разрушения, с регистрацией продольной силы P и величины взаимного перемещения (сближения) концов образца Δ (рис. 3). Прогиб образца в средней части f определяют непосредственно измерением в процессе испытания или косвенно по значениям сближения концов Δ , с учетом формы изогнутой линии стержня.

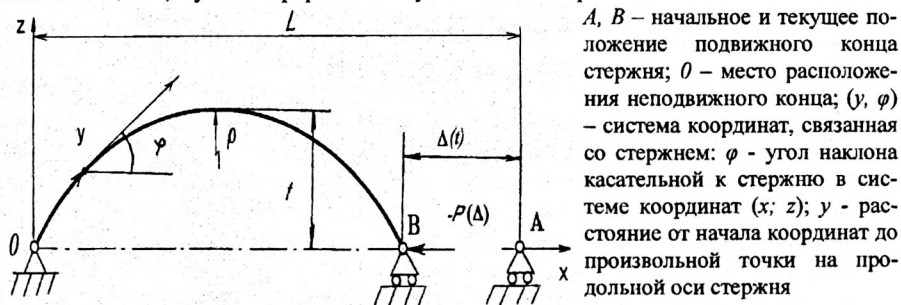


Рисунок 3 - Расчетная схема упругого стержня при продольном изгибе

Классическая теория продольного изгиба идеального тонкого упругого стержня дает выражения для определения прочности $\sigma_{\text{пр}}$, предельной деформации $\varepsilon_{\text{пр}}$ и модуля Юнга $E_{\text{пр}}$ материала, из которого изготовлен стержень:

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{P \cdot f}{w} \pm \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot d^3}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \pm d / 2 \rho, \quad (10)$$

$$E_{\text{пр}} = \partial \sigma_{\text{пр}} / \partial \varepsilon_{\text{пр}}, \quad (11)$$

где w , d – момент сопротивления поперечного сечения и диаметр образца, ρ – радиус кривизны изогнутой линии в средней части, в месте наибольшего прогиба.

Как показали расчеты и измерения, составляющая напряжения в выражении (9), обусловленная растяжением/сжатием, занимает около 1,0–1,5% от прочности, поэтому влиянием растяжения/сжатия при испытаниях на продольный изгиб можно пренебречь.

Для определения величины прогиба f и радиуса кривизны ρ в выражениях (9) и (10) численным решением уравнения продольного изгиба упругого стержня получены формулы, которые связывают в безразмерном виде f и ρ с величиной Δ , измеряемой в эксперименте. Для круглых упругих стеклопластиковых стержней, выражения для определения прочности и деформации принимают вид:

$$\sigma_{\text{пр}} = \pm \frac{32}{\pi^2 d^3} \cdot PL \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{(\delta + 0,2519\delta^2 + 0,077267\delta^3 + 0,078775\delta^4)}{(0,125 - 0,0152\delta - 0,0083\delta^2)}}; \quad (12)$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{L} \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{(\delta + 0,2519\delta^2 + 0,077267\delta^3 + 0,078775\delta^4)}{(0,125 - 0,0152\delta - 0,0083\delta^2)}}. \quad (13)$$

Здесь $\delta = \Delta/L$ – относительное сближение концов стержня при продольном изгибе; L – исходная длина стержня.

Ограничением данного метода является то, что расчетные выражения справедливы для модели идеального упругого стержня, однако в ходе дальнейших исследований метод продольного изгиба получил развитие и для вязкоупругих материалов.

Автором были выполнены оценки влияния на диаграмму нагружения и точность испытаний наиболее значимых факторов: сдвига, сжатия, кривизны образцов, эксцентриситета. Исследование проводили с помощью численных решений, которые сравнивали с экспериментальными данными. Показано, что отличие численных решений от экспериментальных не превышает 1 %, а влияние различных факторов на прочность составляет от 1 до 2 %, что пренебрежимо мало для инженерных испытаний. Для более точной оценки свойств предложены корректирующие выражения для учета влияния перечисленных факторов при реальных испытаниях, в отличие от идеальной схемы.

В процессе апробации метода усовершенствованиям подвергались конструкции устройств для испытаний. На первом этапе устройства вертикального крепления образца и датчики контроля силы и перемещения размещались на базе испытательной машины Р-05, что вызывало потери на трение в узле передачи нагрузки от опоры к датчику, необходимость учета собственного веса образца и опор в показаниях нагрузки, ограничения по нагрузке до 5 кН и длине испытуемых стержней до 600 мм.

В целях расширения возможностей метода были разработаны автономные установки с горизонтальным расположением оси нагружаемого стержня отдельно для испытаний образцов диаметром 4–8 мм, при длине от 150 до 300 мм и более толстых стержней диаметром 10–46 мм при длине от 360 до 1950 мм.

Для минимизации потерь на трение в узлах передачи нагрузки от образца к силоизмерительному датчику усовершенствована конструкция неподвижной опоры с помощью шарнирной подвески, отстоящей от места взаимодействия наконечника и силоизмерителя, что обеспечивает высокую точность получаемых результатов.

Типичная диаграмма нагружения образца СПА-5,5 мм методом продольного изгиба на разработанной установке приведена на рисунке 4а, а на рисунке 4б представлена диаграмма нагружения, обработанная с помощью выражений (11)–(13).

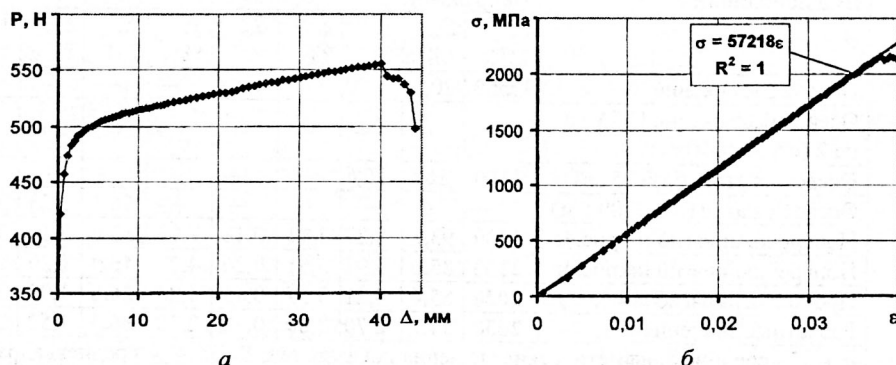


Рисунок 4 – Исходная (а) и обработанная (б) диаграмма нагружения СПА диаметром 5,5 мм длиной 200 мм на продольный изгиб

Для испытанного образца искомые параметры имеют следующие значения: $\sigma_{mv}=2160$ МПа, $\varepsilon_{mv}=0,038=3,8\%$ и $E_{mv}=57,2$ ГПа. Дополнительно можно заключить, что однонаправленные стеклопластиковые стержни ведут себя как линейно-упругие вплоть до разрушения. Это утверждение соответствует литературным данным и позволяет применить модель линейно-упругого стержня к испытуемым образцам.

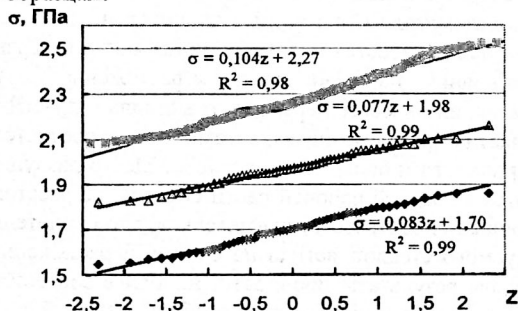


Рисунок 5 – Зависимости прочности от обратной функции нормального распределения

Апробацию описанной установки проводили на выборке стеклопластиковых стержней в количестве по 60–200 штук от трех партий, заведомо отличавшихся прочностными характеристиками в связи с разной степенью армирования. Результаты распределения образцов по прочности показаны на рисунке 5, из которого видно, что закон распределения

соответствует нормальному с отклонениями до 2 %.

В таблице 4 приведены сводные результаты сравнительных испытаний однонаправленных стеклопластиковых стержней разными методами, рассмотренными выше (при сжатии, растяжении, трехточечном и продольном изгибе). Для каждого вида нагружения выбраны наилучшие результаты испытаний, свидетельствующие о наиболее качественном методе и оборудовании для испытаний.

Согласно полученным данным, значения модуля, измеренные разными методами, являются наиболее воспроизводимыми, величина разброса находится в пределах 2-4 %, что объясняется технологическими разбросами свойств изделий. Следовательно, модуль упругости малочувствителен к методу испытаний.

Таблица 4 – Сводные результаты испытаний

Вид испытаний	Напряжение			Деформация			Модуль		
	σ , МПа	S_σ , МПа	V_σ , %	ε , %	S_ε , %	V_ε , %	E , ГПа	S_E , ГПа	V_E , %
Осевое растяжение	1350	70,2	5,20	—	—	—	—	—	—
Осевое растяжение СПА типа 2 (с анкером)	—	—	—	—	—	—	56,3	1,39	2,47
Осевое сжатие (база 25 мм)	1100	182	16,6	—	—	—	—	—	—
Осевое сжатие (база 100 мм)	—	—	—	—	—	—	56,1	1,23	2,19
Поперечный изгиб по рис.4а	1130	93,7	8,27	2,23	0,18	7,85	53,0	2,10	3,97
Поперечный изгиб по рис.4г	2180	85,0	3,91	5,51	0,26	4,73	45,9	1,20	2,62
Продольный изгиб	2020	85,4	4,21	3,67	0,15	4,20	56,8	1,99	3,50
Расчетные значения	2030	54,7	2,70	3,60	0,10	2,78	56,3	1,52	2,70
σ , ε , E – средние арифметические значения показателей; S_σ , S_ε , S_E – среднеквадратическое стандартное отклонение от средних значений; V_σ , V_ε , V_E – значения коэффициентов вариации для прочности, предельной деформации и модуля упругости соответственно									

Совпадение значений модуля при сжатии, растяжении и изгибе позволяет использовать правило смесей для расчета теоретических значений прочности и модуля упругости, задавшись значениями деформации. Расчетные значения в этом случае служат для оценки качества того или иного метода испытаний по величине реализации теоретической прочности. По данным таблицы, прочность и предельная деформация образцов зависят от метода испытаний в значительно большей степени, чем модуль. Критерием оценки качества метода является место и характер разрушения образца. При испытаниях на осевое сжатие и растяжение разрушение всегда происходит в захватах, или в месте перехода от металла к пластику и редко наблюдается в рабочей части образца между захватами. Этому соответствуют и более низкие значения прочности и большой их разброс. Место разрушения образцов при изгибе находится в средней рабочей части образца, на расстоянии от зажимов, и характер разрушения соответствует «метелке», что свидетельствует о равнопрочности испытуемого стеклопластика на сжатие и растяжение. При испытаниях на изгиб получены результаты прочности, наиболее соответствующие теоретическим расчетным данным, и наименьший разброс значений, обусловленный не погрешностью метода, а разбросами свойств образцов.

За многолетний период приемосдаточного контроля СПА на БЗС накоплен достаточно большой статистический материал, который показывает, что при контроле разных партий изделий одним и тем же методом результат испытаний может изменяться в пределах 10-15 % (при внутривидовом разбросе 2-4 %), что является обычным разбросом свойств для ПКМ.

Анализируя данные, приведенные в таблице, отметим, что методы испытаний при растяжении, сжатии и поперечном изгибе не универсальны для определения упругих и прочностных характеристик. Для измерения прочности при сжатии используют короткий образец, чтобы исключить потерю устойчивости, а для измерения модуля упругости используют более длинные стержни для установки экстензометра и уменьшения погрешности измерений. При растяжении удается проводить измерение модуля и прочности на одном образце, но так же, как и при сжатии, невозможно получить диаграмму нагружения вплоть до разрушения стержня, из-за вероятности повреждения дорогостоящих приборов при разрушении образца. По этим показателям метод продольного изгиба значительно превосходит рассмотренные аналоги, поскольку позволяет получать максимально большое количество определяемых параметров из результата единичного испытания одного образца, дополнительно к известным и принятым характеристикам дает информацию о линейном поведении образца, позволяет экспериментально определить силу потери устойчивости, энергию разрушения, и записать диаграмму деформирования образца вплоть до момента разрушения, которое происходит в средней части, в зоне наибольшего прогиба, и всегда удалено от захватов.

Следует отметить простоту и универсальность метода испытаний, высокую точность измерений, низкую энергоемкость установок (для потери устойчивости образца и разрушения требуется сила, в 50 раз меньшая нагрузки при растяжении/сжатии), возможность автоматизации процесса испытаний, воспроизводимость результатов испытаний в разных независимых организациях.

Сдвиг вдоль волокон. Экспериментальные исследования были выполнены в два этапа. На первом этапе выбрана форма нажимного наконечника для проведения испытаний, на втором определена длина образца и испытательной базы.

Испытания проведены на разрывной машине Р-05 на образцах СПА диаметром 5,5 мм до разрушения в приспособлении по той же схеме и с теми же нажимными наконечниками, что и для трехточечного изгиба (рис. 2).

В момент разрушения фиксировали максимальное значение поперечной силы F , величину предельного прогиба f в середине образца и характер разрушения (излом или скол вдоль волокон). По результатам испытаний рассчитывали предел прочности на сдвиг вдоль волокон τ испытанного образца по формуле Журавского:

$$\tau = \frac{8}{3} \cdot \frac{F}{\pi \cdot d^2}$$

Экспериментально установлено, что наиболее часто, в 100 % случаев разрушений, сдвиг волокон наблюдался при использовании нажимного наконечника с резиновой прокладкой (рис. 2з). Этой же схеме испытания соответствуют и максимальные значения напряжения сдвига 40-60 МПа, которые на 44 % выше значений, полученных при испытаниях с цилиндрическим наконечником, на 31 % — при испытаниях с наконечником в форме шкива и на 16 % — при испытаниях с тем

же наконечником, но без резиновой прокладки. Такое различие значений обусловлено концентрацией контактных напряжений для наконечников разных форм. Таким образом, как с точки зрения полученной средней величины прочности, так и количества разрушений вследствие сдвига, оптимальной выбрана схема по рисунку 2г.

На следующем этапе провели испытания по выбранной схеме образцов диаметром 4,0; 5,5 и 7,5 мм на длине испытательной базы $L_v = 5d \dots 10d$ с шагом 0,5d. В результате анализа зависимости прочности образцов от длины экспериментально установлено оптимальное значение $L_v = 9d$, при длине образца не менее $11d$, чтобы исключить выскальзывание образца из опор при испытаниях.

В предложенном виде методика применяется для определения прочности на сдвиг вдоль волокон СПА диаметром 5,5 и 7,5 мм ТУ 2296-001-20994511 и стержней для электроизоляторов диаметром от 4 до 22 мм ТУ 2296-009-20994511. Использование ее для испытаний стержней больших диаметров ограничено габаритными размерами приспособления, размерами и мощностью испытательной машины. Развитие технологии получения стержней изоляторов диаметром до 46 мм и 80 мм поставило задачу разработки другой методики испытаний, обеспечивающей достоверные результаты.

Одним из видов испытаний на сдвиг является продавливание образцов на приспособлении, состоящем из пуансона и матрицы с минимальным зазором между ними. Для разработки схемы испытания применительно к стержням круглого сечения были проведены специальные исследования и сравнение с результатами, получаемыми методом трехточечного изгиба.

Предел прочности при сдвиге вдоль волокон методом продавливания определяют по формуле:

$$\tau = \frac{P}{\pi d_n L}, \quad (14)$$

где P – продольная сила; d_n – диаметр поверхности сдвига; L – длина образца.

Экспериментальные исследования провели в диапазоне варьирования длин образцов от 5 до 20 мм с шагом 5 мм для стержней диаметром 20, 26 и 36 мм; в диапазоне изменения диаметра матрицы от 5 до 40 мм с шагом 5 мм, при постоянном значении зазора 0,25 мм на образцах длиной 10 мм, отрезанных от одного стержня диаметром 46 мм; в диапазоне изменения зазоров 0,15; 0,25; 0,5; 0,75 мм при фиксированном диаметре матрицы 11 мм на образцах длиной 10 мм от стержней диаметрами 26, 36 и 46 мм. В результате анализа значений прочности и коэффициентов вариации выбрали наиболее оптимальную высоту образца 10 мм и величину зазора между пуансоном и матрицей 0,5 мм.

При сравнении результатов испытаний стержней методами трехточечного изгиба и продавливания на образцах, отрезанных от одних стержней, получили качественную корреляцию, свидетельствующую о том, что все значения прочности для двух методов находятся в диапазоне от 40 до 65 МПа. Полученные разбросы объясняются малой выборкой образцов для испытаний, и особенностью разрушения при продавливании: сдвиг происходит с образованием на входе гладкой цилиндрической поверхности, которая переходит в неровную на выходе. Таким образом, погрешность расчета прочности на сдвиг по формуле (14) вызвана погрешностью измерения площади сдвига.

Разработанная методика контроля прочности на сдвиг стеклопластиковых стержней диаметром свыше 22 до 46 мм внедрена в ТУ 2296-009-20994511.

Термомеханические испытания. Для ПКМ, состоящих из высокопрочных армирующих волокон и полимерной матрицы, характерным является переход ее из стеклообразного состояния в эластичное при нагревании. Этот переход сопровождается резким и значительным снижением механических характеристик полимерной матрицы, а, следовательно, композиционного материала. В связи с этим исследование термомеханических характеристик является важным и необходимым условием для успешной эксплуатации ПКМ и изделий из них.

Для того, чтобы расширить температурный интервал измерений механических свойств СПА, была усовершенствована методика и разработана автоматизированная установка для термомеханических испытаний высокопрочных анизотропных стержней из ПКМ. Сущность испытаний заключается в нагружении образца методом трехточечного изгиба и измерении зависимости нагрузки от температуры в режиме релаксации напряжений (рис. 6). В результате исследований предложен способ определения температуры стеклования и температуры начала перехода из стеклообразного состояния в высокоэластичное, основанный на определении экстремумов функций первой и второй производной термомеханической кривой – зависимости нагрузки от температуры.

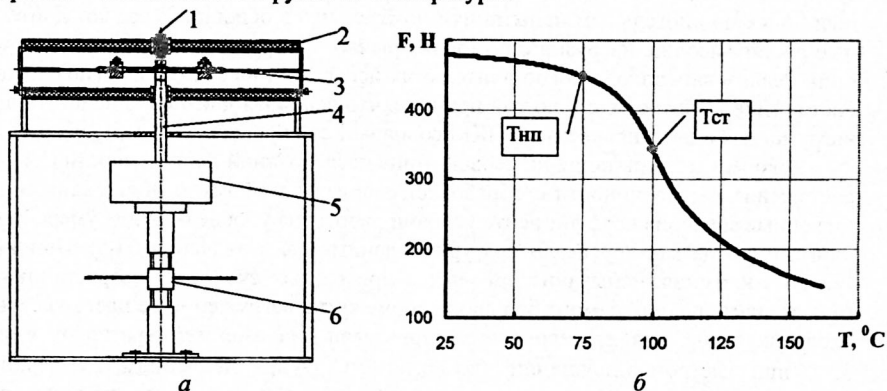


Рисунок 6 – Схема устройства термомеханических испытаний (а): 1 – термометр сопротивления ЭЧП-21; 2 – термокамера; 3 – образец; 4 – тяга; 5 – силоизмерительный датчик ГСП 1909 ДСТ-0,1; 6 – талреп; и типичный вид полученной на устройстве термомеханической кривой (б)

Как малоизученный и оригинальный, метод испытаний термомеханических характеристик стеклопластиков при трехточечном изгибе был протестирован с помощью метода динамического механического анализа при свободно затухающих крутильных колебаниях, разработанного в лаборатории физики полимеров АлтГУ. Сравнение выполняли по значению температуры стеклования образцов. В результате исследований установлено, что между характеристическими температурами, найденными двумя методами, существует корреляция, которая определяется линейной зависимостью $T_{кр\text{ут}} = k \cdot T_{изг}$, с коэффициентом $k = 1,16 \pm 0,06$.

На предлагаемый метод испытания с помощью трехточечного поперечного изгиба получено заключение НИИ Экологического мониторинга при АлтГУ, в котором рекомендуется применение его в заводских лабораториях предприятий, выпускающих или потребляющих полимеры и материалы на их основе, используемые в ответственных конструкциях, для определения температур термомеханических переходов, в интервале значений температур стеклования от 60 до 150 °С.

В связи с высокой производительностью и универсальностью, метод определения температур переходов с помощью трехточечного поперечного изгиба внедрен в технические условия на силовой элемент ТУ 2296-005-20994511 и СПА ТУ 2296-001-20994511.

В третьей главе представлена разработка и усовершенствование экспериментального метода испытаний анизотропных стеклопластиковых стержней на длительную прочность при статических нагрузках. Большое значение для точности измерений длительной прочности имеет выбор величины нагрузки и способа ее приложения, обработки результатов, выбор температур, количества образцов и длительности испытаний.

Схемы нагружений для длительных испытаний такие же, как и для статических, с присущими им достоинствами и недостатками. Патентный и литературный поиск по длительным испытаниям показал, что в основном создают длительные растягивающие нагрузки с помощью рычагов и грузов или специальных машин. Реализовать такой способ длительных испытаний на сжатие и изгиб сложно. Растяжение выбрано еще и по той причине, что основная длительно действующая нагрузка для однонаправленных ПКМ совпадает с направлением армирования.

Ускоренные испытания на первом этапе исследований долговечности СПА на растяжение в совокупности с обработкой данных по формуле Журкова дали заниженные значения коэффициента условий работы на уровне 0,22 для умеренного климата (тогда как другие литературные данные дают значения 0,65). Причины такого занижения: испытания проведены при разных скоростях возрастания нагрузки, длительность самого большого промежутка нагружения не превышала нескольких часов, для исследований использован диапазон температур от минус 32°С при быстром разрушении, до 80...100°С – при медленном, т.е. верхний диапазон температур был значительно выше температуры стеклования связующего СПА (около 70°С) и выше допустимых условий эксплуатации.

Для реальных условий работы СПА характерны все виды длительного нагружения: сжатие, изгиб, растяжение и их комбинация. В литературе для длительной прочности, также как и временной, преобладают мнения о том, что эта величина должна быть разной для перечисленных видов нагружения. Все расхождения обосновывают природой материала и мало внимания уделяют методическим вопросам измерений.

Для уточнения и проверки достоверности результатов ускоренных испытаний и определения длительной прочности стеклопластика отдельно для каждого вида нагружения и сравнения результатов были разработаны метод и устройства длительных испытаний на растяжение, сжатие и продольный изгиб, со статистической обработкой данных.

Устройства длительных испытаний СПА на растяжение требуют нагружения до 20 кН на разрывных машинах типа ГРМ и МТС. Поэтому, для проведения исследований в автономном режиме без дорогостоящего громоздкого оборудования, разработан и запатентован способ и устройство для проведения комплексных длительных испытаний на растяжение, сжатие и изгиб. Сущностью технического решения является нагружение двух идентичных образцов: одного на сжатие, другого на растяжение равной силой с помощью реакции продольно изогнутых стержней, которые выполняют роль нагружающего механизма и испытуемых образцов одновременно.

Методика длительных испытаний заключается в нагружении двух представительных выборок образцов от одной партии в количестве 20–40 штук на временную прочность при заданной температуре с заданной скоростью нагружения и на долговечность в условиях постоянно приложенной нагрузки заданной интенсивности при заданной температуре. Методика предусматривает расчет величины длительно действующей нагрузки на основе статистической обработки результатов испытаний на прочность образцов первой группы с таким расчетом, чтобы за несколько месяцев, отведенных на эксперимент, обеспечить разрушение половины или большей части образцов второй группы, для построения силовых зависимостей.

Способ обработки длительных испытаний заключается в определении законов распределения образцов по прочности и долговечности, совместной обработки из непротиворечивой гипотезы о соответствии образцов с более высокими значениям прочности образцам с более высокими значениями долговечности. Чтобы обобщить данные для разных схем нагружения при сжатии, растяжении и продольном изгибе и результаты испытаний образцов от разных партий, в качестве интенсивности нагрузки выбрана не абсолютная, а относительная величина приложенных напряжений. При статистическом распределении образцов по прочности эта величина показывает, на какую долю от временной прочности нагружен индивидуально каждый образец при длительных испытаниях. Такой подход позволяет недостаток ПКМ – большие разбросы по прочности и долговечности – обратить в достоинство метода испытаний: учитывается каждый разрушенный образец, в то время как, обычно, принято усреднять результаты испытаний 10–20 образцов в одну точку. При этом относительные напряжения исследованных образцов вследствие разбросов находятся на уровне 0,7–0,9 от предела прочности. Статистическая обработка результатов испытаний по Вейбулу показывает, что закон распределения образцов по прочности наиболее соответствует экспоненциально-нормальному и определяется выражением (15), а распределение по долговечности образцов подчиняется логарифмически-нормальному закону (16) с коэффициентами достоверности $R^2 = 0,99$.

$$\exp[\sigma_v(P)] = 0,44P_{\text{ср}} + 5,02; \quad (15)$$

$$\ln(\tau) = 10,76P_{\text{ср}} + 2,62. \quad (16)$$

Результаты испытаний одинаковых образцов ускоренным методом на растяжение и трехточечный изгиб и обработка по формуле Журкова дают значение относительной прочности от 0,20 до 0,32 от значения исходной, в то время как длительные испытания прямым методом дают значения от 0,63 до 0,65, совпадающие

для растяжения и продольного изгиба. Таким образом, испытания образцов предлагаемым методом дают более достоверные результаты, соответствующие литературным данным, обладают простотой, малой трудоемкостью и не требуют большого времени на проведение эксперимента. Достоверность данных доказана воспроизводимостью результатов, полученных в нескольких независимых организациях: БЗС, ФГУП «СибНИА», ИЦ «СибНИИСтрой».

Большое расхождение экспериментальных данных и расчетных на основе кинетической концепции разрушения по формуле Журкова может объясняться самой природой материала. Зависимость долговечности СПА в полулогарифмических координатах (рис. 7) имеет нелинейный характер, а кривые располагаются в форме «веера», сходящегося вверху, что свидетельствует о наличии предела длительной прочности стеклопластиков, согласно исследованиям Скудры и Булавса, в то время как для других материалов линейные зависимости по выражению (2) сходятся вниз, что говорит об отсутствии предела длительной прочности.

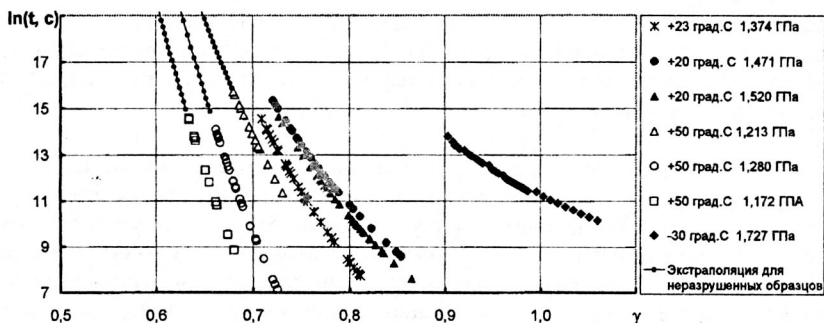


Рисунок 7 - Зависимость долговечности СПА от приведенного напряжения

Разработанный метод, устройства испытаний и способ обработки результатов нашли применение для исследований длительной прочности СПА диаметром 5,5 мм в диапазоне температур от минус 30 до 50°C.

В четвертой главе приведены результаты исследований усталостной прочности стеклопластиковых круглых стержней разными методами. Проведены испытания на растяжение на машинах MTS-10 и ГРМ-1. Трудоемкое изготовление образцов, материало- и энергоемкое проведение испытаний и недостатки, присущие растяжению (разрушение образца в захватах, большие продольные нагрузки, высокий разброс результатов) обосновали необходимость развития более высокопроизводительного метода усталостных испытаний.

Предложен способ усталостных испытаний и запатентованное устройство, основанные на продольном изгибе по заданному закону сближения концов шарнирно опертого гибкого стержня, измерении усилия, возникающего в результате сопротивления образца продольному изгибу, определении количества циклов до разрушения. Принцип действия установки (рис. 8а) заключается в уравнивании рычажной системы попарно установленными на противоположных плечах рычага упругими стержнями, доведенными до состояния потери устойчивости. Это позволяет испытывать любое четное количество стержней, ограниченное габаритными разме-

рами и прочностью узлов конструкции. В процессе испытаний энергия привода затрачивается лишь на выведение системы из состояния равновесия, что для продольно изогнутых упругих стержней составляет 10-14 % от силы потери устойчивости. Это обеспечивает малую энергоемкость установки.

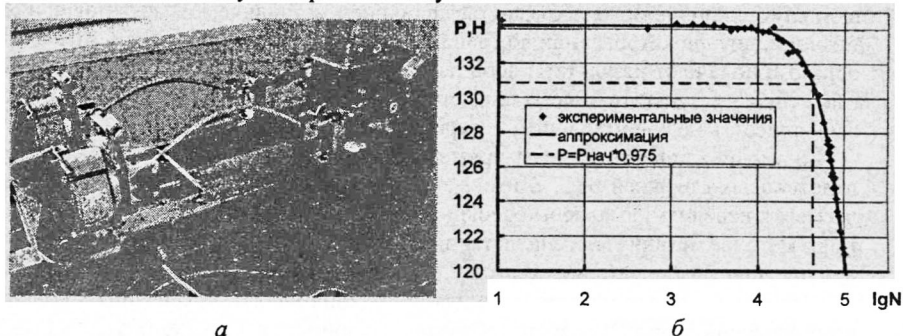


Рисунок 8 – Установка для циклических испытаний на продольный изгиб (а) и зависимость продольной силы от количества циклов (б)

Типичный график изменения нагрузки при продольном циклическом изгибе в полулогарифмических координатах приведен на рисунке 8б.

Приведенная зависимость P от N наилучшим образом аппроксимируется «сигмоидом» $P = a + b / (1 + \exp((- \log N - c) / d))$, где a , b , c , d – эмпирические коэффициенты.

При обработке результатов за начало разрушения принято значение N , соответствующее падению нагрузки на 2,5 % от начальной вследствие разрушения образца. Измеряемая продольная сила прямо пропорциональна модулю Юнга, следовательно, данная установка основана на измерении зависимости от циклов нагружения модуля, который является более воспроизводимой характеристикой исследованных стержней, чем предельные свойства – прочность и деформация, и имеет малые разбросы 1-2 %. Это обеспечивает повышение точности измерений.

Разрушение образцов всегда происходит в месте наибольшего прогиба в средней части, вдали от захватов, где на образец не действуют контактные нагрузки (рис. 8а). При этом возникают сжимающие и растягивающие напряжения на внутренних и наружных слоях, соответственно. Таким образом, результаты циклических испытаний на продольный изгиб оценивают усталостную прочность образца в комплексе на растяжение-сжатие, а характер разрушения в средней части подтверждает более высокую достоверность результатов по сравнению с другими методами циклических испытаний, не исключающих действие контактных напряжений.

Предложенная установка в связи с малой энергоемкостью, высокой точностью измерений и производительностью применяется на БЗС для массовых циклических испытаний однонаправленных стеклопластиковых стержней при отработке рецептуры и технологии и приемосдаточных испытаниях.

Сравнение результатов циклических испытаний для разных конструкций соединений стеклопластиковых стержней диаметром 5,5 и 19 мм на растяжение, ба-

зальтопластиковых стержней диаметром 6 мм и стеклопластиковых стержней диаметром 5,5 мм на продольный изгиб и растяжение, показало, что усталостная прочность при продольном изгибе на 20 % выше, чем при растяжении. Это соответствует известным из литературы наблюдениям других исследователей, и в нашем случае вполне может объясняться влиянием металлических захватов при растяжении, внутри которых или по границе происходит разрушение стержня. Таким образом, получают результаты испытаний конкретной конструкции, которые всегда меньше результатов испытаний стержня на продольный изгиб, отражающих выносливость не конструкции, а материала – однонаправленного стеклопластика.

В пятой главе приведены примеры прикладных исследований для стеклопластиковых стержней БЗС. В итоге анализа результатов и требований, предъявляемых к изделиям, выявлены основные определяемые характеристики и разработаны методы механических испытаний, учитывающие индивидуальные требования и условия эксплуатации стержней.

На выбор метода и устройства для испытаний влияют требования к конкретному изделию, форма и размеры образцов. Например, в ТУ 2296-005-20994511 на силовой элемент определяют прочность и модуль Юнга методом растяжения вдоль армирования, поскольку для диаметра прутков от 1,5 до 2 мм метод продольного или трехточечного изгиба обладают большей погрешностью, чем прямое растяжение. Погрешность обусловлена периодическим профилем силового элемента. При растяжении модуль и прочность зависят от диаметра во второй степени, тогда как при продольном изгибе – в четвертой, соответственно, погрешности измерений возрастают в квадрате.

Установки для приемосдаточных испытаний большого числа партий на продольный изгиб автоматизированы в целях повышения производительности, увеличения точности и снижения влияния человеческого фактора на результат (рис.9).

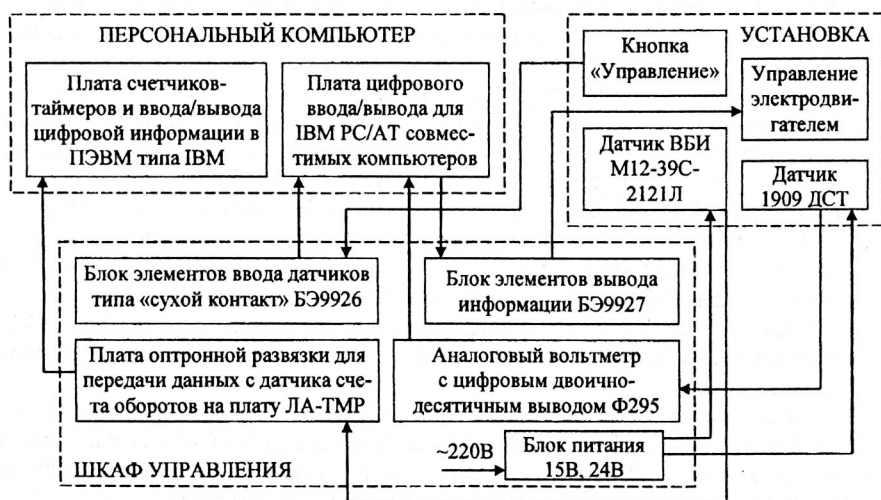


Рисунок 9 - Функциональная схема автоматизированной системы управления испытанием стержней на продольный изгиб

В результате многолетнего успешного применения метода продольного изгиба для призмодаточных испытаний СПА и стержней для электроизоляторов накопились статистические данные о свойствах стержней разных диаметров. При анализе данных установлено, что прочность и модуль Юнга могут быть рассчитаны по правилу смесей (1) с отклонением экспериментальных данных от расчетных до 2 %. Стержни больших диаметров обладают меньшей прочностью и предельной деформацией, чем стержни СПА-5,5 и 7,5 мм при сопоставимом значении модуля Юнга.

Разработанные методы и устройства использованы на БЗС для испытаний СПА на длительную прочность в процессе выполнения данного диссертационного исследования. Учитывая важность выводов для широкомасштабного внедрения, для повышения достоверности была проведена дополнительная независимая экспертиза двумя аккредитованными в области испытаний материалов организациями: ИЦ «СибНИИСтрой» и ФГУП «СибНИИА», г Новосибирск.

Для расчета длительной прочности γ , с коэффициентом запаса в исследованном диапазоне температур, не превышающих 50 °С, предложено эмпирическое выражение:

$$\gamma_i = 0,75 - 0,0064 \cdot \ln t,$$

которое хорошо согласуется с расчетами по выражению (3), предложенному другими авторами по длительным испытаниям стеклопластиков.

Получены сопоставимые данные о циклической выносливости однонаправленных стеклопластиковых стержней в СибНИИА на устройствах, установленных в захватах испытательных машин MTS, которые можно в рамках данной работы рассматривать как независимую экспертизу предложенного метода определения ресурса работоспособности СПА при циклических нагрузках.

В результате объединения данных циклических испытаний на продольный изгиб, растяжение и литературных данных в относительной приведенной форме, предложено эмпирическое выражение для расчета усталостной прочности изделий исследуемого класса в зависимости от циклов нагружения:

$$\gamma_{\text{ц}} = 0,9 \cdot N^{-0,15}. \quad (17)$$

На основании результатов испытаний временной, длительной и усталостной прочности и предложенных вариантов обработки данных продемонстрирована методика инженерного расчета ответственных конструкций с применением однонаправленных стеклопластиковых стержней. В основу ее закладывается расчетная или временная прочность по статистическим результатам испытаний представительной выборки стеклопластиковых стержней на продольный изгиб. Для учета влияния масштабного фактора (технологии изготовления) и способа заделки вводятся понижающие коэффициенты γ_m и γ_z . Зависимость прочности от температуры в стеклообразном состоянии определена методом продольного изгиба и учитывается выражением:

$$\sigma_{\text{в-с}}(T) = K_c \gamma_z \cdot \sigma_b(T) = K_c \gamma_z \cdot [\gamma_m \cdot \sigma_{\text{в.пр}} + 5,6(296 - T)],$$

где K_c - коэффициент запаса прочности, для большинства конструктивных материалов равный 0,75-0,85; для исследованных стеклопластиков эмпирические значения коэффициента γ_m в пределах 0,58-0,96 и коэффициента заделки для исследованных узлов соединения γ_z от 0,45 до 0,6.

С учетом длительности испытаний, выражение для оценки длительной прочности узлов соединений примет вид:

$$\sigma_T = K_c \gamma_t \gamma_s [\gamma_T \sigma_{в.пр} + 5,6(296 - T)] = K_c [0,75 - 0,0064 \ln t] \cdot \gamma_T \cdot [\gamma_T \sigma_{в.пр} + 5,6(296 - T)]$$

С учетом выражения (17), расчетное уравнение для оценки зависимости усталостной прочности узлов соединения реальных стеклопластиковых стержней от количества циклов и температуры эксплуатации изделий, имеет вид:

$$\sigma_{у.с}(T) = \gamma_s [\gamma_T \sigma_{в.пр} + 5,6 \cdot (296 - T)] \cdot 0,9 \cdot N^{-0,15}$$

Таким образом, продемонстрированы примеры использования разработанных методов и устройств для испытаний конкретных изделий, выпускаемых БЗС. С помощью оригинальных способов обработки результатов получены выражения для оценки конструкционной прочности однонаправленных стеклопластиков, работающих в условиях длительного статического и циклического нагружения, в диапазоне температур эксплуатации.

В главе 6 рассмотрены перспективы применения предложенных методов и оборудования в машиностроении.

При оценке хладостойкости СПА в СибНИА на маятниковом копре в соответствии с ГОСТ-4647 в диапазоне температур от 20 до минус 120 °С получены существенные разбросы значений ударной вязкости, которые не позволяют сделать количественную оценку зависимости ударной вязкости от температуры. Ориентируясь на средние и минимальные значения даже при таких больших разбросах, можно заключить, что с понижением температуры ударная вязкость увеличивается. По результатам испытаний сделан вывод о высокой хладостойкости стеклопластиковых стержней при любых низких температурах эксплуатации.

Для оценки морозостойкости температурную зависимость прочности исследовали методом продольного изгиба стержней диаметром 5,5 мм в диапазоне температур от 60 °С до минус 70 °С по предложенной в главе 2 методике.

Для оценки температурной зависимости прочности результаты испытаний нескольких партий привели к комнатным условиям. Полученная зависимость относительной прочности от температуры имеет степенной вид (рис. 10).

В качестве независимой экспертизы испытания при различных температурах методом продольного изгиба были выполнены в лаборатории ПКМ ИПНГ СО РАН (г. Якутск). В этих экспериментах образец с захватами был расположен внутри термокамеры.

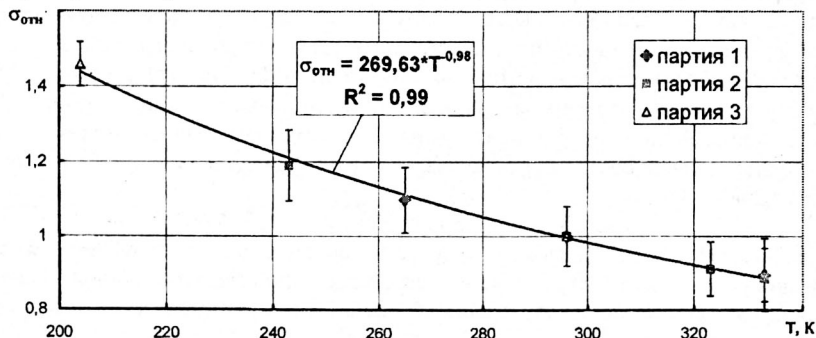


Рисунок 10 – Зависимость относительной прочности СПА от температуры

Диаграммы нагружения образцов подтвердили общую закономерность предложенного нами метода продольного изгиба не только при комнатной, но и при других температурах в области стеклообразного состояния связующего. По результатам испытаний ИПНГ установлено, что стержни из ПКМ обладают свойством линейной упругости вплоть до разрушения при температуре испытаний минус 60 и 20 °С.

По результатам независимых испытаний показано, что деформация и прочность стержней с понижением температуры увеличиваются, а модуль упругости остается практически постоянным. Это подтверждает приведенные выше результаты собственных исследований и литературные данные о температурной зависимости прочности стеклопластиков.

При испытаниях на продольный изгиб нескольких партий СПА выявлено увеличение предельной деформации, предела прочности и плотности энергии разрушения при уменьшении температуры от 60 до минус 70 °С при практически постоянном значении модуля упругости. Стеклопластиковые стержни являются морозостойкими и пригодными к эксплуатации в любых климатических условиях в нашей стране.

Результаты испытаний на морозостойкость были внесены в технические условия на стеклопластиковые изделия ТУ 2296-001-20994511, ТУ 2296-005-20994511, ТУ 2296-009-20994511, что позволяет с 2003 года эксплуатировать их во всепогодных условиях.

Испытательными центрами «Стройэксперт» и «СибНИИстрой», были проведены сравнительные испытания СПА ТУ 2296-001-20994511-2004 и базальтопластиковой арматуры (БПА) ТУ 2292-014-20994511-2005; БПА ТУ 571490-002-13101102-2002; связей композитных гибких цементостойких для кирпичной кладки ТУ 2296-003-23475912-2000; анкерных стержней стеклопластиковых ТУ 2296-001-40886723-2001 разных производителей.

Исследования выполняли с помощью методов и устройств, разработанных в настоящей диссертации, определив ряд показателей для сравнения, по следующим видам основных испытаний: продольный изгиб до и после химического старения; прочность сцепления гибких связей с бетоном при растяжении; осевое сжатие; теплостойкость по температуре стеклования при трехточечном изгибе; химическая стойкость связей под нагрузкой при повышенной температуре. В результате испытаний получены количественные значения определяемых характеристик для каждого вида изделий.

Отмечена высокая эффективность, универсальность и производительность разработанных методов испытаний для применения их к оценке механических характеристик однонаправленных стержней круглого сечения из ПКМ. При испытаниях методом продольного изгиба образцов в исходном состоянии установлено, что все они соответствуют модели линейно-упругого стержня, с максимальным отклонением не более 2 %. В состаренном состоянии поведение стержней существенно отличается от линейно-упругого, величина отклонения для изделий разных производителей составляет от 6,2 % до 76,3 %. Показано, что результаты испытаний таких стержней на продольный изгиб необходимо обрабатывать на линейном участке диаграммы $\sigma - \epsilon$. Для снижения погрешности испытаний неупругих стержней предложены поправки в расчетные выражения, с учетом которых

метод продольного изгиба может быть использован (с точностью 2-5 %) также для испытаний материалов, не обладающих линейной упругостью.

С целью оценки применимости метода продольного изгиба для плоских образцов из других ПКМ, были выполнены сравнительные испытания пластин углепластика КМУ-11, вырезанных из плит толщиной 2, 4 и 10 мм, изготовленных Всероссийским институтом авиационных материалов (ВИАМ) на основе эпоксидных связующих ЭДТ-69Н и ЭДТ-69Н(М) и углеродных равнопрочных тканей УТ-900-3К (Россия) и Porcher 3692 (Франция) с объемным содержанием наполнителя 58%.

Испытания на продольный изгиб были выполнены на установке, смонтированной на стандартной разрывной машине по методике, разработанной для круглых стержней, с точностью измерения нагрузки 0,1Н и перемещения 0,01 мм. Для обеспечения достоверности результатов часть параллельных образцов была испытана в ВИАМе на аттестованном оборудовании по ГОСТ 25.601-80 (растяжение), ГОСТ 25.602-80 (сжатие) и ГОСТ 25.604-82 (изгиб).

Выполненные исследования доказали работоспособность метода продольного изгиба и для плоских образцов. Например, типичная диаграмма нагружения образцов толщиной 2 мм приведена на рисунке 11а, из которого видно линейно-упругое поведение образцов вплоть до разрушения, описываемое выражением:

$$P = P_3 \cdot [1 + 0,5038\delta + 0,2318\delta^2 + 0,3151\delta^3] \quad (18)$$

где P_3 – эйлерова (критическая) сила.

Напряжение и деформацию в образцах рассчитывали по выражениям (12) и (13), вводя ширину и толщину для плоских образцов, вместо диаметра для круглых. Модуль Юнга определяли по углу наклона на линейном участке диаграммы напряжение-деформация (рис. 11б).

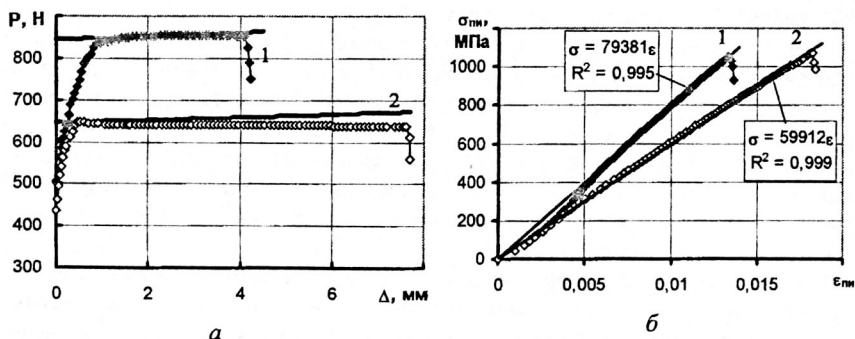


Рисунок 11 - Диаграмма нагружения (а) и зависимость напряжения от деформации (б) для пластин углепластика: 1 – тип ЭДТ-69Н/УТ-900-3К; 2 – тип ЭДТ-69Н(М)/Porcher 3692; линии - аппроксимация моделью линейно-упругого стержня

Проведена количественная оценка отклонений от упругости θ_p как относительное отклонение экспериментальных значений нагрузки от рассчитанных по выражению (18). Аналогично проводили оценку отклонений от линейности θ_σ на диаграмме зависимости напряжение-деформация.

Результаты сведены в таблицу 5. Из данных таблицы следует, что стандартные методы испытаний при растяжении, сжатии и изгибе дают существенно разные значения прочности (на 11-24%) и модуля упругости (на 19-26%), которые отличаются от теоретических представлений о прочности упорядоченно армированных ПКМ. Наблюдаемые экспериментальные результаты соответствуют распространенному мнению о том, что прочность и модуль упругости при растяжении должны быть выше, чем при сжатии. Прочность при статическом изгибе имеет наибольшее значение, модуль явно занижен вследствие сдвиговых деформаций, которые не учитываются при обработке результатов по ГОСТ 25.604-82 с короткой базой образца. Расхождения и неточность измерения прочности при испытаниях на растяжение объясняется влиянием захватов на результат, при испытаниях на сжатие - малой базой испытаний 10 мм, смятием торцев, влиянием захватов.

Таблица 5 – Результаты испытаний плит КМУ-11 толщиной 2 мм

Вид испытаний	Параметр	Серия 1		Серия 2		Серия 3	
		Ср.знач.	$V, \%$	Ср. знач.	$V, \%$	Ср. знач.	$V, \%$
Растяжение ГОСТ 25.601-80	σ_p , МПа	920	5,16	685	3,65	—	—
	E_p , ГПа	65,5	1,53	62,7	2,47	—	—
Сжатие ГОСТ 25.602-80	σ_c , МПа	790	7,53	700	7,14	670	9,85
	E_c , ГПа	48,0	2,08	—	—	63,6	1,34
Статический изгиб ГОСТ 25.604	$\sigma_{сн}$, МПа	1040	3,02	—	—	1120	5,46
	$E_{сн}$, ГПа	52,6	3,72	—	—	72,2	0,55
Продольный изгиб	$\sigma_{пл}$, МПа	1110	5,04	831	12,6	1000	8,48
	$E_{пл}$, ГПа	66,6	7,53	59,6	5,65	83,2	1,72
	$\varepsilon_{пл}$, %	1,82	9,27	1,57	9,36	1,35	6,23
	$W_{пл}$, МДж/м ³	10,10	13,9	6,60	21,2	6,60	13,5
	θ_p , %	5,29	—	5,39	—	4,57	—
	$\theta_{сн}$, %	8,09	—	11,24	—	13,1	—
Примечание. Образец 1 - ЭДТ-69Н(М)/ Porcher 3692 (вырезка под углом 0°); Образец 2 - ЭДТ-69Н(М)/ Porcher 3692 (вырезка под углом 90°); Образец 3 - ЭДТ-69Н/УТ-900-3К (вырезка под углом 0°); $\sigma, E, \varepsilon, W$ – прочность, модуль Юнга, предельная деформация и плотность энергии							

Из данных, полученных стандартными методами испытаний, наиболее достоверными можно считать значения прочности при статическом изгибе и значения модуля Юнга при растяжении. Эти показатели лучшим образом согласуются с результатами испытаний методом продольного изгиба: значения прочности расходятся на 5,9 %, значения модуля – на 2 %, что сопоставимо с точностью измерений (1-2%) и естественным разбросом свойств образцов 5-7 %. На диаграмме нагружения и в таблице видно, что метод продольного изгиба чувствителен к упругим свойствам образца: более жесткий образец 1 показывает больший модуль, но меньшее значение предельной деформации, чем образец 2, при соизмеримом значении предела прочности (рис. 11). Дополнительно, метод продольного изгиба позволяет для каждого образца в одном испытании определять значение предельной деформации вплоть до разрушения; значение плотности энергии, которая выражает удельную работу образца до разрушения (энергетическая характеристика, ана-

логичная ударной вязкости). Метод продольного изгиба позволяет оценить упругое поведение стержней и величину отклонения материала от идеально-упругого.

Из сопоставления данных таблицы следует вывод о том, что метод продольного изгиба может найти применение не только для определения механических свойств круглых стержней из однонаправленных стеклопластиков, но и для пластин, вырезанных из плит слоистых углепластиков. По сравнению со стандартными, метод продольного изгиба для пластин дает сопоставимые и более точные результаты в одном испытании, согласующиеся с теоретическими представлениями о прочности и упругости композитов. Метод продольного изгиба обладает простотой подготовки образцов и проведения испытаний, оперативностью контроля, воспроизводимостью при испытаниях в разных независимых лабораториях, не требует специального оборудования, легко автоматизируется.

Аналогичные исследования при растяжении, сжатии и продольном изгибе были выполнены на пластинах углепластика толщиной 4 и 10 мм, которые показали при нагружении продольным изгибом более существенную неупругость, чем пластины толщиной 2 мм. Сравнение результатов испытаний показало, что метод продольного изгиба дает значения прочности, в среднем отличающиеся на 4...10 % от прочности при статическом изгибе, и значения модуля упругости, отличающиеся на 7...15 % от значений модуля при растяжении. Отличия значений модуля упругости и прочности между стандартными методами еще более значимые, чем для плит толщиной 2 мм – от 20 % до двух раз. Степень неупругости и нелинейности составляет для образцов толщиной 4 мм 10...14 %, для образцов толщиной 10 мм – до 30 %.

Благодаря опыту испытаний большого количества образцов, в диапазоне неупругости от 1 % до 76 %, разработана специальная методика испытаний, которая использована для определения механических характеристик неупругих стержней периодического профиля ТУ 2296-016-20994511-2009.

Таким образом, показана широкая область применения метода продольного изгиба не только для упругих однонаправленных стеклопластиковых стержней, но также и неупругих стекло- и базальтопластиковых круглых стержней постоянного диаметра, плоских образцов из углепластиковых плит и стеклопластиковых стержней периодического профиля. В дальнейшем метод продольного изгиба вследствие простоты и достоверности получаемых результатов, может найти полезные применения для термомеханических исследований, исследований временной, длительной и усталостной прочности различных материалов.

В приложениях представлены акты внедрения разработанных методов и устройств для испытаний анизотропных ПКМ в ООО «БЗС» (г. Бийск), СибНИА (г. Новосибирск), ИПНГ СО РАН (г. Якутск). Также представлены методики испытаний, введенные в технические условия для заводского контроля изделий на основе однонаправленных стеклопластиковых стержней круглого сечения.

Приведены акты внедрения материалов научных исследований в учебный процесс кафедры «Физика и технология композиционных материалов» в АлтГТУ (г. Барнаул) и кафедры «Технология химического машиностроения» в БТИ (г. Бийск).

ВЫВОДЫ

1. Разработан и развит метод испытаний на продольный изгиб и устройства для его осуществления, которые позволяют проводить испытания образцов с размерами и профилем однонаправленных упругих стеклопластиковых стержней без механической обработки, определять в одном испытании значения прочности, предельной деформации, модуля Юнга и другие показатели с высокой точностью. Введены корректирующие выражения для точной оценки свойств материалов, чье поведение отличается от идеально-упругого тела более чем на 5 %. Проведена апробация метода для испытаний базальтопластиковых круглых стержней диаметрами 5-7 мм (отклонения от упругости от 10 до 70 %) и плоских образцов из углепластиковых плит толщиной 2, 4 и 10 мм (отклонения от упругости от 7 до 30 %).

2. Разработаны и внедрены метод и устройства для длительных статических испытаний анизотропных ПКМ. Получен патент на способ и устройство для комплексных испытаний на растяжение, сжатие и продольный изгиб, которые за трехмесячный период испытаний позволяют прогнозировать работоспособность конструкций на срок эксплуатации до 50-100 лет. Проведена апробация предложенных методов и устройств для испытаний стеклопластиковых стержней, длительностью от двух недель при минус 30°C до 3-х лет при 50 °C, до 7 лет в комнатных условиях.

3. Разработаны и внедрены метод и запатентованное устройство для усталостных испытаний анизотропных ПКМ в режиме циклических переменных нагрузок, которые позволяют получать достоверные кривые усталости по результатам испытаний ограниченного числа образцов. Проведена апробация метода и устройства на однонаправленных стекло- и базальтопластиковых стержнях круглого сечения в диапазоне циклов нагружения до 10^7 .

4. Экспериментально доказано, что существующие стандартные и нестандартные методы и устройства для испытаний ПКМ на растяжение, сжатие и изгиб непригодны для изучения механических свойств анизотропных однонаправленных стеклопластиковых стержней круглого сечения. Стандартные методы предназначены для плоских образцов, но при испытаниях пластин дают результаты для сжатия и растяжения, отличающиеся от 20 до 100% для разных видов и схем нагружения, так и для образцов разных форм и размеров при одном виде нагружения. Для критерия оценки качества и погрешностей методов испытаний предложены теоретические характеристики, рассчитанные по правилу смесей для модельного однонаправленного стеклопластика, выбранного предметом исследований.

5. Разработаны и усовершенствованы методы и устройства для получения достоверных результатов испытаний однонаправленных стеклопластиковых стержней круглого сечения на растяжение, сжатие и трехточечный поперечный изгиб. Показано, что даже трудоемкая тщательная подготовка образцов и приспособлений для растяжения и сжатия вдоль волокон не позволяет добиться разрушения в рабочей части образца и получить истинные значения прочности материала. Достоверные значения прочности получены модифицированным методом трехточечного поперечного изгиба, а модуля Юнга - методами осевого растяжения и сжатия.

6. В результате испытаний на сжатие и устойчивость однонаправленных стеклопластиковых стержней разной длины с жесткой, шарнирной и комбинированной заделкой установлена зависимость критического напряжения от длины, которая имеет три характеристические области. Найдены границы областей и предложены эмпирические выражения для расчета величины критического напряжения, с учетом коэффициентов вариации и запаса прочности. Полученная зависимость справедлива для однонаправленных стеклопластиков с объемным содержанием армирующих волокон от 0,60 до 0,75 в широком исследованном диапазоне длин и диаметров стержней.

7. Разработаны устройства для испытаний на сдвиг вдоль волокон методом трехточечного изгиба короткой балки круглых стержней диаметром до 22 мм, и методом продавливания стержней диаметром свыше 22 мм. Разработано устройство для термомеханических испытаний образцов ПКМ круглой и плоской формы при нагружении трехточечным поперечным изгибом.

8. Разработаны и внедрены рекомендации по выбору способа испытаний натурных фрагментов изделий без механической обработки, учитывающие их форму, размеры и свойства. Определены факторы геометрического подобия для испытаний круглых стержней в широком диапазоне варьирования размеров. Разработанные методы иллюстрированы конкретными примерами приемосдаточных заводских испытаний однонаправленных стеклопластиковых стержней разных диаметров для силового элемента, СПА, насосной штанги, электроизоляторов.

9. Проведена апробация и государственная экспертиза разработанных методов термомеханических испытаний, статических испытаний на продольный изгиб, длительных и усталостных испытаний в нескольких независимых лабораториях ведущих испытательных центров и научных учреждений. Получены положительные заключения о разработанных методах испытаний для анизотропных ПКМ.

10. На основании теоретических представлений, анализа и обобщения экспериментальных данных по статическим испытаниям на растяжение, сжатие, поперечный и продольный изгиб, термомеханическим испытаниям, по длительным и усталостным испытаниям для изучаемого класса однонаправленных стеклопластиковых стержней предложена методика инженерного расчета ответственных конструкций в реальных условиях эксплуатации. Методика внедрена для проекторочного расчета конструкций с применением стеклопластиков в строительстве, нефтегазовом машиностроении, электротехнической и горнодобывающей промышленности.

11. Разработанные методы и устройства для статических испытаний на растяжение, сжатие, поперечный и продольный изгиб, на сдвиг вдоль волокон, для термомеханических испытаний введены для определения контролируемых параметров при производстве изделий в технические условия на СПА ТУ 2296-001-20994511, стеклопластиковый силовой элемент ТУ 2296-005-20994511, стеклопластиковые стержни для электроизоляторов ТУ 2296-009-20994511, анкер стеклопластиковый ТУ 3142-012-20994511-05, стержни арматурные периодического профиля ТУ 2296-016-20994511. Методы, устройства и полученные результаты использованы для сравнительных, исследовательских, типовых и сертификационных испытаний стекло- и базальтопластиковых образцов в нескольких независимых испытательных центрах, а также нашли применение в учебном процессе.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Блазнов, А.Н. Прогнозирование длительной прочности стеклопластиковой арматуры / А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, А.Н. Луговой, В.Ф. Савин // *Механика композ. матер. и констр.* – 2003. – Т.9. – № 4. – С. 579-592.
2. Волков, Ю.П. Метод определения механических характеристик стержней по результатам испытаний на продольный изгиб / Ю.П. Волков, А.Н. Луговой, В.Ф. Савин, А.И. Хе, А.Н. Блазнов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2004. – Т. 70, № 9. – С. 58-62.
3. Блазнов, А.Н. Аппроксимирующие выражения для описания параметров тонкого продольно изогнутого, шарнирно опертого стержня / А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин, А.Н. Луговой // *Известия вузов. Машиностроение.* – 2004. – № 12. – С. 16-26.
4. Савин, В.Ф. Исследование механических свойств стеклопластиковых стержней методом продольного изгиба / В.Ф. Савин, А.Н. Луговой, А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, А.И. Хе // *Механика композиц. матер. и констр.* – 2004. – Т.10. – № 4. – С. 499-516.
5. Волков, Ю.П. Методика определения прочности стеклопластиковой арматуры при межслоевом сдвиге / Ю.П. Волков, А.Н. Блазнов, А.Н. Луговой, В.Ф. Савин // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2005. – Т. 71, № 11. – С. 39-41.
6. Савин, В.Ф. Продольный изгиб как метод определения механических характеристик материалов / В.Ф. Савин, А.Н. Луговой, Ю.П. Волков, А.Н. Блазнов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2006. – Т. 72. – № 1. – С. 55-58.
7. Блазнов, А.Н. Испытания на длительную прочность стержней из композиционных материалов / А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, А.Н. Луговой, В.Ф. Савин // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2006. – Т. 72. – № 2. – С. 44-52.
8. Савин, В.Ф. Прогнозирование прочности конструкций из однонаправленно армированных стеклопластиковых стержней / В.Ф. Савин, А.Н. Блазнов, М.Г. Петров, Г.И. Русских // *Механика композиц. матер. и констр.* – 2007. – Т.13. – № 1. – С. 97-112.
9. Савин, В.Ф. Методика определения сопротивления усталости стеклопластиковых стержней круглого сечения / В.Ф. Савин, А.Н. Блазнов, Н.М. Киселев // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2007. – Т. 73. – № 7. – С. 48-52.
10. Савин, В.Ф. Влияние эксцентриситета оси стержня относительно опор на результаты испытания при продольном изгибе / В.Ф. Савин, А.Н. Блазнов, Н.М. Киселев, А.В. Ширяева // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2007. – Т. 73. – № 9. – С. 70-75.
11. Блазнов, А.Н. Исследование прочности и устойчивости однонаправленных стеклопластиковых стержней при осевом сжатии / А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин, Ю.П. Волков, В.Б. Тихонов // *Механика композиц. матер. и констр.* – 2007. – Т.13. – № 3. – С. 426-440.
12. Савин, В.Ф. Метод построения силовых зависимостей долговечности для стержней из полимерных композиционных материалов / В.Ф. Савин, А.Л. Верещагин, А.Н. Блазнов, А.Н. Луговой, В.Б. Тихонов, О.В. Быстрова // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2008. – Т. 74. – № 8. – С. 58-62.
13. Савин, В.Ф. Усталостная прочность и выносливость стержней из композиционных материалов / В.Ф. Савин, Н.М. Киселев, А.Н. Блазнов, А.Л. Верещагин, О.В. Быстрова // *Механика композиц. матер. и констр.* – 2008. – Т.14. – № 3. – С. 332-352.
14. Блазнов, А.Н. Автоматизированный релаксметр для определения температуры стеклования полимеров / А.Н. Блазнов, О.В. Старцев, В.Ф. Савин // *Научно-технические ведомости СПбГПУ.* – 2009. – №1. – С.198.
15. Блазнов, А.Н. Автоматизированная установка для определения прочности и модуля Юнга упругих стержней при продольном изгибе / А.Н. Блазнов, О.В. Старцев, В.Ф. Савин // *Научно-технические ведомости СПбГПУ.* – 2009. – №1. – С.199.

16. Блазнов, А.Н. Автоматизированная установка для усталостных испытаний стержней при продольном изгибе / А.Н. Блазнов, О.В. Старцев, В.Ф. Савин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – №1. – С.200.

17. Поздеев, С.П. Способ испытаний упругих стержней на долговечность и устройство для его осуществления / С.П. Поздеев, А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин, В.Б. Тихонов, Н.М. Киселев // Пат. РФ № 2357223. Оpubл.27.05.2009, бюл. №15.

18. Поздеев, С.П. Установка для усталостных испытаний образцов/ С.П. Поздеев, В.Ф. Савин, А.Н. Блазнов, Н.М. Киселев// Пат.РФ №2357225.Оpubл.27.05.2009, бюл.№15.

19. Испытания упругих стержней методом продольного изгиба / В.Ф. Савин, А.Н. Блазнов, О.В. Старцев и др. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2009. – 222 с.

20. Савин, В.Ф. Метод определения долговременной прочности стеклопластиковой арматуры / В.Ф.Савин, А.Н. Блазнов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник / Под ред. Г.В. Леонова. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2001. – С. 214-219.

21. Блазнов, А.Н. Исследование устойчивости стеклопластиковых стержней / А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, А.Н. Луговой, В.Ф. Савин // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник / Под ред. Г.В. Леонова. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2002. – С. 153-158.

22. Блазнов, А.Н. Исследование долговечности стеклопластиковой арматуры / А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, А.Н. Луговой, В.Ф. Савин // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник / Под ред. Г.В. Леонова. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2002. – С. 158-163

23. Савин, В.Ф. Методика контроля термомеханических характеристик полимерных композиционных материалов / В.Ф. Савин, Ю.П. Волков, А.Н. Луговой, А.Н. Блазнов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник / Под ред. Г.В. Леонова. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2002. – С. 163-167.

24. Савин, В.Ф. Продольный изгиб как средство контроля механических характеристик композиционных конструкционных материалов / В.Ф. Савин, Ю.П. Волков, А.Н. Луговой, А.Н. Блазнов, А.И. Хе // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник / Под ред. Г.В. Леонова. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2002. – С. 167-172.

25. Блазнов, А.Н. Определение механических характеристик стержней из композиционных материалов методом продольного изгиба / А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, А.Н. Луговой и др.// Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады IV Всерос. науч.-практ. конф. – М.: ЦЭИ «Химмаш», 2004. – С. 86-90.

26. Блазнов, А.Н. Долговременная прочность стержней из композиционных материалов / А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, А.Н. Луговой и др.// Проблемы качества в строительстве: Материалы IV Всерос. конф. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2003. – С. 18-23.

27. Пушилин, А.А. Автоматизированная установка для определения термомеханических характеристик полимерных композиционных материалов / А.А. Пушилин, А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, В.И. Голубев, В.Ф. Савин // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник / Под ред. Г.В. Леонова. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2003. – С. 116-122.

28. Блазнов, А.Н. Исследование деформации стеклопластиковых стержней при продольном изгибе / А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, А.Н. Луговой и др.// Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузов. сборник / Под ред. Г.В. Леонова. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2003. – С. 180-185.

29. Блазнов, А.Н. Определение механических характеристик стержней для полимерных изоляторов методом испытания на продольный изгиб / А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, А.Н. Луговой, В.Ф. Савин, А.И. Хе // Подвесные и опорные полимерные изоляторы: производство, технические требования, методы испытаний, опыт эксплуатации, диагностика: Материалы межд. науч.-техн. конф. – СПб: Изд-во ПЭИПК, 2004. – С. 42-56.

30. Блазнов, А.Н. Стеклопластиковые стержни ООО «Бийский завод стеклопластиков» для полимерных изоляторов / А.Н. Блазнов, Ю.И. Ладыгин, А.Н. Луговой, Г.И. Русских, В.Ф. Савин // Подвесные и опорные полимерные изоляторы: производство, технические требования, методы испытаний, опыт эксплуатации, диагностика: Материалы межд. науч.-техн. конф. – СПб: Изд-во ПЭИПК, 2004. – С. 57-67.

31. Блазнов, А.Н. Моделирование поведения упругого стержня при продольном изгибе / А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, А.Н. Луговой, В.Ф. Савин, А.И. Хе // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвуз. сборник / Под ред. Г.В. Леонова. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2004. – С. 30-33.

32. Блазнов, А.Н. Определение упругих характеристик материалов на примере испытаний армированных пластиков / А.Н. Блазнов, А.Н. Луговой, В.Ф. Савин, Ю.П. Волков // Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте: Материалы III межд. науч.-техн. конф. – Самара: Изд-во ООО «Самплекс», 2005. – С. 39-44.

33. Блазнов, А.Н. Автоматизированная установка для испытаний стеклопластиковых стержней на продольный изгиб / А.Н. Блазнов, А.А. Пушили, А.Н. Луговой и др. // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник / Под ред. Г.В. Леонова. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2005. – С. 36-39.

34. Блазнов, А.Н. Влияние методики на результат испытаний однонаправленных стеклопластиков / А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, А.Н. Луговой, В.Ф. Савин, Г.И. Русских // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник / Под ред. Г.В. Леонова. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2005. – С. 39-42.

35. Блазнов, А.Н. Усталостная прочность стеклопластиковых стержней с оконцевателями / А.Н. Блазнов, А.Н. Луговой, Г.И. Русских, В.Ф. Савин // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: Труды 19-й Всерос. конф. – Новосибирск: Изд-во «Параллель», 2005. – С. 43-47.

36. Савин, В.Ф. Оценка качества и конкурентоспособности гибких связей Бийского завода стеклопластиков / В.Ф. Савин, А.Н. Блазнов, А.В. Ширяева, Н.М. Киселев // Управление качеством образования, продукции и окружающей среды: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 229-234.

37. Блазнов, А.Н. Ресурсосберегающие технологии в испытаниях / А.Н. Блазнов, Н.М. Киселев, В.Ф. Савин // Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Материалы V Всерос. науч.-практ. конф. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 39-45.

38. Савин, В.Ф. Методика и установка для циклических испытаний стержней из полимерных композиционных материалов / В.Ф. Савин, Н.М. Киселев, А.Н. Блазнов, Е.Н. Битков // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VII Всерос. науч.-практ. конф. – М.: ЦЭИ «Химмаш», 2007. – С. 131-134.

39. Савин, В.Ф. Результаты циклических испытаний стержней из полимерных композиционных материалов / В.Ф. Савин, Н.М. Киселев, А.Н. Блазнов, Е.Н. Битков // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VII Всерос. науч.-практ. конф. – М.: ЦЭИ «Химмаш», 2007. – С. 135-138.

40. Блазнов, А.Н. Испытание стеклопластиковых стержней при различных температурах / А.Н. Блазнов, В.Б. Тихонов, Е.Н. Битков, В.Ф. Савин // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VII Всерос. науч.-практ. конф. – М.: ЦЭИ «Химмаш», 2007. – С 138-140.

41. Блазнов, А.Н. Зависимость критического напряжения от гибкости стеклопластиковых стержней / А.Н. Блазнов, В.Б. Тихонов, В.Ф. Савин, Ю.П. Волков // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VII Всерос. науч.-практ. конф. – М.: ЦЭИ «Химмаш», 2007. – С 140-144.

42. Старцев, О.В. Сравнительные испытания стержней из полимерных композиционных материалов по определению температуры стеклования методом трехточечного изгиба и крутильных колебаний / О.В. Старцев, А.С. Кротов, В.Ф. Савин, Ю.П. Волков, А.Н. Блазнов // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VII Всерос. науч.-практ. конф. – М.: ЦЭИ «Химмаш», 2007. – С 144-147.

43. Луговой, А.Н. Хладостойкость и морозостойкость стеклопластика, выпускаемого ООО «Бийский завод стеклопластиков» / А.Н. Луговой, В.Ф. Савин, М.Г. Петров, А.Н. Блазнов, О.В. Старцев // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VII Всерос. науч.-практ. конф. – М.: ЦЭИ «Химмаш», 2007. – С 149-153.

44. Киселев, Н.М. Усталостная прочность стержней из композиционных материалов при продольном изгибе и растяжении / Н.М. Киселев, В.Ф. Савин, А.Н. Блазнов // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VIII Всерос. науч.-практ. конф. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2008. – С 137-142.

45. Тихонов, В.Б. Метод и установка для испытаний строительной арматуры из полимерных композиционных материалов / В.Б. Тихонов, А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VIII Всерос. науч.-практ. конф. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2008. – С 142-146.

46. Рудольф, А.Я. Продольный изгиб для определения прочности плит авиационных углепластиков / А.Я. Рудольф, В.Ф. Савин, О.В. Старцев, А.Н. Блазнов, А.Е. Раскутин // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады IX Всерос. науч.-практ. конф. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2009. – С 148-153.

47. Блазнов, А.Н. Модуль упругости однонаправленных стеклопластиков при растяжении, сжатии и изгибе / А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин, М.Г. Петров // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады IX Всерос. науч.-практ. конф. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2009. – С 129-133.

48. Блазнов, А.Н. Метод трехточечного изгиба для испытаний однонаправленных стеклопластиковых стержней круглого сечения / А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин, Ю.П. Волков, О.В. Старцев // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады IX Всерос. науч.-практ. конф. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2009. – С 133-138.

49. Блазнов, А.Н. Методы механических испытаний анизотропных стеклопластиковых стержней / А.Н. Блазнов // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады IX Всерос. науч.-практ. конф. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2009. – С 120-124.